



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TÍTULO**

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE ELECTROLIZADOR ALCALINO  
PARA ENRIQUECIMIENTO DE DIÉSEL**

**TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**PRESENTA  
OSCAR AZUETA SOSA**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL**

**ASESORES  
DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA  
DRA. BEATRIZ ESCOBAR MORALES  
DR. GUILLERMO BECERRA NÚÑEZ**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2018



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO  
“DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE ELECTROLIZADOR ALCALINO  
PARA ENRIQUECIMIENTO DE DIÉSEL”

ELABORADO POR  
OSCAR AZUETA SOSA

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

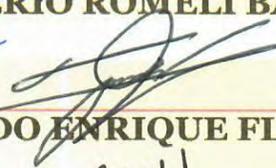
**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

COMITÉ DE TESIS

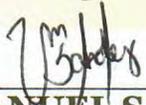
DIRECTOR:

  
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

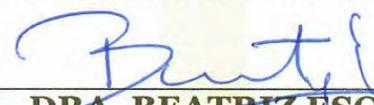
ASESOR:

  
DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA

ASESOR:

  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

ASESORA:

  
DRA. BEATRIZ ESCOBAR MORALES

ASESOR:

  
DR. GUILLERMO BECERRA NÚÑEZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool por su singular personalidad e incansable motivación para concluir este proyecto. Así como a mi comité de tesis y asesores: Dra. Beatriz Escobar Morales, Dr. Fernando Flores Murrierta, Dr. Victor Manuel Sánchez Huerta y Dr. Guillermo Becerra Núñez.

Al apoyo incondicional de mi familia, que estando lejos su compañía siempre se mantuvo a mi lado, dedicado especialmente para mi padre y madre, quienes han sido mi voluntad para llegar un poco más lejos.

A la señorita Karla Sabido Alavez por su inmensurable apoyo y motivación para concluir este pequeño ciclo y darle paso a algo más grande. Gracias por tu amor.

*El esfuerzo de uno mismo es la mejor recompensa que se puede esperar.*

## CONTENIDO

Introducción .....	I
Resumen .....	III
Planteamiento del problema.....	IV
Justificación .....	VII
Hipótesis .....	VII
Objetivos.....	VII
Capítulo 1.    Tecnología de hidrógeno.....	1
1.1.    La importancia del hidrógeno.....	1
1.1.1.    Energía.....	2
1.1.2.    Contaminación del aire .....	3
1.1.3.    Economía .....	6
1.2.    Hidrógeno, portador de energía .....	7
1.2.1.    Aplicaciones del hidrógeno .....	11
1.2.1.1.    Implementación en motores térmicos. ....	11
1.2.1.2.    Implementación en sistemas de energía.....	14
1.3.    Métodos de producción de hidrógeno .....	16
1.3.1.    Procesos electroquímicos.....	17
1.3.1.1.    Electrólisis de agua.....	17
1.3.1.2.    Foto-electrólisis .....	17
1.3.2.    Procesos biológicos.....	18
1.3.2.1.    Fermentación oscura .....	19
1.3.2.2.    Foto-fermentación .....	19
1.3.2.3.    Bio-reacción de desplazamiento agua-gas .....	19
1.3.2.4.    Bio-fotólisis de agua .....	20
1.3.3.    Procesos termicos y termoquímicos .....	20
1.3.3.1.    Termólisis .....	20
1.3.3.2.    División de agua termoquímica.....	20

1.3.3.3.	Gasificación de carbón .....	21
1.3.4.	Reformado de hidrocarburos .....	21
Capítulo 2.	Electrólisis alcalina .....	25
2.1.	Introducción .....	25
2.2.	Principales tipos de electrolizadores .....	27
2.2.1.	Electrolizador alcalino .....	29
2.2.2.	Electrolizadores PEM .....	31
2.2.3.	Electrolizadores de óxido sólido (SOE).....	32
2.3.	Fundamentos de electrólisis .....	33
2.3.1.	Analogía eléctrica del proceso de electrólisis .....	34
2.3.2.	Termodinámica de celdas electroquímicas .....	36
2.3.3.	Aspectos cinéticos .....	39
2.4.	Condiciones de operación. ....	41
2.5.	Caracterización electroquímica.....	42
2.5.1.	Curvas de polarización estática .....	43
Capítulo 3.	Desarrollo experimental .....	45
3.1.	Electrolizador “ $\beta$ ” .....	45
3.2.	Caracterización del electrolizador “ $\beta$ ” .....	45
3.3.	Electrolizador “ $\alpha$ ” .....	49
3.4.	Caracterización del electrolizador “ $\alpha$ ” .....	53
Capítulo 4.	Resultados y discusión.....	56
4.1.	Resultados de electrolizador “ $\beta$ ” .....	56
4.1.1.	Prueba rápida .....	56
4.1.2.	Prueba prolongada .....	58
4.2.	Resultados del electrolizador “ $\alpha$ ” .....	62

4.2.1.	Prueba rápida .....	62
4.2.2.	Prueba prolongada .....	65
4.3.	Comparación entre los $e_a$ , $\beta$ y $\alpha$ .....	69
4.4.	Energía disponible para combustión .....	73
	Conclusiones .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo mundial de fuentes de energía en Ton de petróleo equivalente [4].	2
Figura 1.2 Fuentes emisoras relacionadas con la contaminación del aire [9].	4
Figura 1.3 Consumo energético per cápita y producto nacional bruto (PNB) [15].	6
Figura 1.4 Visión del hidrógeno como vector de energía; producción, almacenamiento y uso final [13].	10
Figura 1.5 Motor rotativo empleado para el uso de hidrógeno [24].	12
Figura 1.6 Reducción de tasas de monóxido y dióxido de carbón del motor con diésel y diésel con hidrógeno al 30% [27].	13
Figura 1.7 Incremento de tasas de óxido de nitrógeno del motor con diésel y diésel con hidrógeno al 30% [27].	14
Figura 1.8 Representación esquemática de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones PEMFC [29].	15
Figura 1.9 Esquema de una celda fotoelectroquímica, el fotocátodo donde el agua se reduce a H <sub>2</sub> y el foto-ánodo donde el agua se oxida para producir O <sub>2</sub> [31].	18
Figura 2.1 Proceso electroquímico del agua, separación de hidrógeno y oxígeno [2].	25
Figura 2.2 Electrolizador monopolar o tipo tanque.	28
Figura 2.3 Electrolizador bipolar o tipo filtro prensa.	28
Figura 2.4 Diagrama esquemático de un electrolizador alcalino: (1) sección del ánodo, (2) sección del cátodo, (3) diafragma, (4) electrodos, (5) marco de celda, (6) fuente de poder DC, (7) placas finales, (8) separadores de gas [9].	31
Figura 2.5 Representación esquemática de una celda electrolizadora PEM.	32
Figura 2.6 Ilustración gráfica del potencial de celda respecto a la densidad de corriente y sobrepotenciales inmersos.	34
Figura 2.7 Ilustración gráfica del potencial de celda para la efectuación de electrólisis del agua en función de la temperatura.	39

Figura 2.8 Ilustración esquemática de la doble capa electroquímica y la distribución del potencial en las fronteras del electrodo. ....	40
Figura 2.9 Ilustración grafica de curvas características de una celda electrolítica alcalina a diferentes temperaturas. ....	42
Figura 3.1 Electrolizador $\beta$ . ....	46
Figura 3.2 Partes que complementan el electrolizador $\beta$ . ....	46
Figura 3.3 Formación de la película de tono amarillento en las placas bipolares. ....	47
Figura 3.4 Total de piezas del electrolizador de referencia $\beta$ . ....	48
Figura 3.5 Banco de test de mediciones. ....	49
Figura 3.6 Diseño realizado en SolidWorks del electrolizador $\alpha$ . ....	50
Figura 3.7 Placas bipolares del electrolizador $\alpha$ . ....	51
Figura 3.8 Separadores de acrílico. ....	51
Figura 3.9 Perforación de placas finales. ....	52
Figura 3.10 Ensamblado final del electrolizador $\alpha$ . ....	53
Figura 3.11 Oxidación de placa bipolar en el extremo del ánodo. ....	54
Figura 3.12 Despliegue del EA antes de iniciar el protocolo. ....	54
Figura 3.13 Banco de mediciones. ....	55
Figura 3.14 Burbujas de oxi-hidrógeno. ....	55
Figura 4.1 Desempeño del EA $\beta$ de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 segundos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V. ....	56
Figura 4.2 Desempeño del EA $\beta$ de 2 celdas con saltos de potencial de 0.2 V/5 segundos comprendidos en 2.0 y 4.6 V. ....	57
Figura 4.3 Desempeño del EA $\beta$ de 5 celdas con saltos de potencial de 0.5 V/5 segundos comprendidos en 5.0 y 11.5 V. ....	57
Figura 4.4 Desempeño del EA $\beta$ de 7 celdas con saltos de potencial de 0.7 V/5 segundos comprendidos en 7.0 y 16.1 V. ....	58
Figura 4.5 Desempeño del EA $\beta$ de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V. ....	59

Figura 4.6 Desempeño del EA $\beta$ de 2 celdas con saltos de potencial de 0.2 V/5 minutos comprendidos en 2.0 y 4.6 V.....	59
Figura 4.7 Desempeño del EA $\beta$ de 5 celdas con saltos de potencial de 0.5 V/5 minutos comprendidos en 5.0 y 11.5 V.....	60
Figura 4.8 Desempeño del EA $\beta$ de 7 celdas con saltos de potencial de 0.7 V/5 minutos comprendidos en 7.0 y 16.1 V.....	60
Figura 4.9 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba rápida de 5 segundos. ....	61
Figura 4.10 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba prolongada de 5 minutos. ....	62
Figura 4.11 Desempeño del EA $\alpha$ de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 segundos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V.....	63
Figura 4.12 Desempeño del EA $\alpha$ de dos celdas con saltos de potencial de 0.2 V/5 segundos comprendidos entre 2.0 y 4.6 V.....	63
Figura 4.13 Desempeño del EA $\alpha$ de cinco celdas con saltos de potencial de 0.5 V/5 segundos comprendidos entre 5.0 y 11.5 V. ....	64
Figura 4.14 Desempeño del EA $\alpha$ de siete celdas con saltos de potencial de 0.7 V/5 segundos comprendidos entre 7.0 y 16.1 V. ....	64
Figura 4.15 Desempeño del EA $\alpha$ de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V. ....	65
Figura 4.16 Desempeño del EA $\alpha$ de dos celdas con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 2.0 y 4.6 V. ....	66
Figura 4.17 Desempeño del EA $\alpha$ de cinco celdas con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 5.0 y 11.5 V. ....	66
Figura 4.18 Desempeño del EA $\alpha$ de siete celdas con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 7.0 y 16.1 V. ....	67
Figura 4.19 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba rápida de 5 segundos del EA $\alpha$ . ....	68
Figura 4.20 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba prolongada de 5 minutos. ....	69
Figura 4.21 Serie de curvas del desempeño potencial-corriente para la prueba rápida de 5 segundos del EA $\beta$ y EA $\alpha$ .....	70

Figura 4.22 Serie de curvas de polarización obtenidas de la prueba rápida para el EA $\beta$ y el EA $\alpha$ .....	71
Figura 4.23 Serie de curvas del desempeño potencial-corriente para la prueba prolongada de 5 minutos del EA $\beta$ y EA $\alpha$ .....	72
Figura 4.24 Serie de curvas de polarización obtenidas de la prueba rápida para el EA $\beta$ y el EA $\alpha$ .....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades físicas y químicas del hidrógeno .....	8
Tabla 1.2 Valores gravimétricos y volumétricos de hidrógeno y combustibles fósiles comunes ref. [19].....	9
Tabla 1.3 Especificaciones de las celdas de combustible comunes ref. [7]. .....	15
Tabla 2.1 Diferencias entre celdas monopolares y bipolares.....	29
Tabla 2.2 Especificaciones de electrolizador alcalino, PEM y SOE [10]. .....	33
Tabla 3.1 Parámetros del electrolizador $\beta$ . .....	45
Tabla 3.2 Parámetros del electrolizador $\alpha$ . .....	53

## INTRODUCCIÓN

La evolución en la obtención de energía en la vida del ser humano a lo largo de la historia lo ha posicionado como consumidor predominante. Desde su remota existencia hasta hoy en día, la humanidad ha sido un creciente consumidor de energía, con el propósito de asegurar su bienestar y confort. Desde un principio, fue evidente que los recursos naturales abundantes y bastos, serían suficientes para cubrir sus necesidades energéticas.

En un primer escenario, se utilizó la materia orgánica a base de recursos maderables como primera fuente energética; descubrió que la combustión de ésta le proporcionaba calor, alimento, seguridad y autoridad. Con el transcurso del tiempo, el uso de razón, la penuria de cubrir necesidades y con la tarea de facilitarse el trabajo; empleó la utilización de los recursos que tenía a su alcance nuevamente, observó el movimiento de las masas de aire y agua, dedujo que la cinética y el potencial de estos le serían útiles y fue así como se aprovechó de estas para transformarla en energía mecánica; obteniendo como resultado máquinas a las que denominó molinos de viento y molinos de agua [1-2].

La invención de máquinas no quedó allí, pues se continuaron desarrollando más dispositivos para el empleo específico de diferentes tareas, esto dio inicio a un nuevo escenario en donde el descubrimiento y la utilización del carbón mineral como combustible fue el protagonista de una transformación socioeconómica, tecnológica y cultural; a la cual se denominó revolución industrial; donde el uso de la materia prima obtenida del medio pero extraída del subsuelo, fue la fuente energética dominante durante el siglo XVIII y XIX. Posteriormente, después del tropiezo del hombre con el carbón y su uso como combustible para impulsar sus máquinas de vapor y generar energía eléctrica a partir de turbinas; el tercer escenario se abre con el descubrimiento del petróleo. Este se convertiría en la tercera fuente energética más imponente hasta ahora. Pero antes de que eso sucediera, la aparición de los motores de combustión interna tuvo un aporte relevante en el empleo de los derivados de este combustible, e hizo de este un hito en su influencia e importancia para el desarrollo de la vida del hombre que posteriormente se encontraría relacionada con la generación de energía eléctrica. Esta última ha sido la obtención más significativa de energía para el desarrollo de sí mismo [1-2].

Este último evento ha desencadenado una ola de sucesos importantes en la vida del hombre. Desde entonces hasta la actualidad se ha producido un continuo crecimiento de la demanda del petróleo, llegando a ser la base de innumerables servicios básicos para la sociedad actual, desde su utilización para la producción de diversos objetos partiendo como materia prima en el sector industrial, transporte y doméstico hasta ser la base para la generación de energía eléctrica.

Como se ha visto, la historia de la obtención de energía para el hombre está fuertemente ligada a la adaptación de fuentes de energía no renovables o de origen fósil, estos modelos energéticos han creado un riesgo de carácter crítico, como

también hacia la salud y condiciones de vida futura del ser humano. Es de carácter indispensable en la actualidad entender que los modelos energéticos actuales son obsoletos y es esencial especular un nuevo panorama energético en donde la obtención de la energía no provenga de una materia prima o de algún recurso dependiente de la naturaleza, y que principalmente emita contaminación en niveles mínimos y manejables hacia los seres vivos.

En ese sentido y presentando una opción factible y amigable con el medio ambiente que dé respuesta al imparable incremento de energía en un mediano plazo, se propone en este trabajo de investigación la caracterización de un par de electrolizadores alcalinos y su comparación en la generación de hidrógeno y oxígeno (oxi-hidrógeno), con la finalidad de evaluar la factibilidad del sistema para su incorporación en el enriquecimiento de combustibles de motores de combustión. La evaluación se obtendrá mediante la comparación de la respuesta del sistema de alimentación eléctrica y la producción de oxi-hidrógeno. Teniendo como objetivo comprender algunas de las aplicaciones de este singular potencial energético.

## RESUMEN

El escenario energético requiere una implementación emergente de sistemas alternativos provisoros de energía sostenibles. El hidrógeno promete ser un candidato energético capaz de suplir a los tradicionales y ya obsoletos modelos energéticos que continúan causando problemas ambientales, económicos y de salud. Por ello, el presente proyecto desarrolla la temática referente a la importancia de la tecnología del hidrógeno y su impacto en el medio ambiente, economía y en el desarrollo sustentable. Se describen de manera general sus principales aplicaciones enfatizando su implementación en sistemas de energías renovables y en motores de combustión interna como un posible combustible alterno. Debido a la esperada integración del hidrógeno en el campo tecnológico actual y a la creciente demanda de energía, se exploran brevemente los métodos más comunes de producción de este vector energético. En el capítulo 2 se aborda, el estado del arte de un electrolizador alcalino, se describe el proceso de la electrólisis, el funcionamiento de un electrolizador alcalino, sus partes y ciertas consideraciones energéticas fundamentales. En el capítulo 3 se explican los materiales utilizados, equipos y caracterizaciones realizadas a los electrolizadores alcalinos. Posteriormente, en el capítulo 4 se presentan los principales resultados obtenidos de las pruebas rápidas y prolongadas efectuadas en los electrolizadores  $\alpha$  y  $\beta$ , así como la comparación en el desempeño entre ambos sistemas. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este proyecto de investigación.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hasta el día de hoy el sistema de energía está basado en fuentes de combustibles de origen fósil tales como carbón, gas natural y derivados de petróleo, por ningún motivo este método puede ser considerado sostenible a corto ni a largo plazo, puesto que el crecimiento de la población mundial continua en aumento, de alrededor de 7 mil millones de personas hoy en día a más de 9 mil millones para el 2050, con esta tendencia se prevé un crecimiento en la demanda de energía de hasta un 50% para el año 2040, así lo contempla la Agencia Internacional de Energía (AIE) [3]. Si se continúa usando combustibles fósiles como consumo energético mundial, esto se traducirá en más contaminación atmosférica y problemas en el abasto energético. Se sabe que la combustión de este tipo de fuentes primarias emite gases contaminantes nocivos que tienen un impacto negativo tanto en el medio ambiente como en la vida de los seres humanos. Las plantas de ingeniería (generación de energía eléctrica), plantas de fabricación y los vehículos son la principal fuente emisora de gases de efecto invernadero, donde estos gases de escape son los causantes del calentamiento global y cambio climático.

Particularmente el uso de combustibles fósiles en el sector transporte es de gran preocupación, ya que ocupa hoy en día casi una cuarta parte del consumo de energía primaria y global relacionado con las emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Además de ser responsable de aproximadamente el 20% del aumento previsto de las emisiones globales de demanda de energía y gases de efecto invernadero para el año 2040. Actualmente, hay aproximadamente 900 millones de vehículos ligeros en todo el mundo (sin contar los vehículos de dos y tres ruedas) y se prevé que se encuentren circulando en el 2050 alrededor de 2 mil millones de vehículos más, esto según la AIE [4].

Los científicos se ha propuesto buscar soluciones alternativas a la combinación de problemas como: los crecientes precios de los combustibles, el aumento de la conciencia respecto a los problemas ambientales, las preocupaciones sobre seguridad energética, la baja cantidad de concentración de oxígeno en la atmosfera y los problemas de salud causados por el smog en las grandes ciudades. Una rama de solución para los problemas ya mencionados es el hidrógeno.

Un panorama social, económico, ambiental y energético apunta hacia el hidrógeno como vector energético por ser portador de energía limpia (libre de carbono), que junto con la electricidad podría proporcionar la columna vertebral de un futuro sostenible. Concibiendo a un sistema de energía libre carbón, a través de celdas de combustible para la generación de energía eléctrica de baja potencia, donde también el hidrógeno como combustible en generadores de combustión interna y turbinas puede aportar energía [5-6]. Además, se sabe que el hidrógeno se puede obtener a partir de la electricidad mediante la electrólisis de agua.

La electrólisis de agua alcalina es uno de los métodos más fáciles para la producción de hidrógeno, esta puede funcionar a pequeña escala y con fuentes de energía renovables, siendo de esta manera considerada menos contaminante. Un sistema de producción de energía básico: conversión, almacenamiento y uso distribuido conceptual, desempeña un papel muy importante para las comunidades más remotas donde el cableado eléctrico no llega, ya que es factible producir hidrógeno mediante un electrolizador a partir de energía renovable; este puede servir como gas combustible para aplicaciones de calentamiento y un mecanismo de almacenamiento de energía que puede ser usado en celdas de combustible para generar electricidad cuando se requiera [7].

Con la elección del hidrógeno como combustible sustituto, algunos investigadores han realizado pruebas en motores de combustión interna (CI) como sustituto o enriquecimiento del combustible, ya sea gasolina o diésel; debido a que éste aumenta la potencia del motor y puede ayudar en la reducción de la contaminación, el resultado ha sido probado durante los últimos años. La combinación asociada a la composición molecular de hidrógeno y un número de sus notables propiedades (tales como la alta llama de velocidad laminar, intervalo de inflamabilidad de ancho, etc.) muestran que el hidrógeno puede emplearse como un recurso deseable para motores de combustión interna [7-8].

La electricidad y el hidrógeno cumplen las dos condiciones necesarias de un sistema energético sostenible, un esquema de almacenamiento de energía y un producto energético que puede transportarse a largas distancias, son estos los principales medios para suplir a los combustibles fósiles, primordialmente para el sector de transporte como lo son los automóviles, así como fuentes de energía estacionaria para las estaciones repetidoras de señal (telecomunicaciones) en los lugares más remotos del mundo, como también su incorporación en sistemas híbridos residenciales. Estas son solo algunas de las aplicaciones más prácticas en las que el hidrógeno compite por ser el combustible del futuro y que se espera reemplace el sistema energético actual a largo plazo por uno más viable económica, social y ambientalmente.

## REFERENCIAS

- [1] Blog venta generadores; Como ha sido la evolución de la energía a lo largo de la historia. Página de internet, visto mayo 2018. <http://www.ventageneradores.net/blog/la-evolucion-la-energia-lo-largo-la-historia/>
- [2] Mario Huete Guzman; Ensayo de un electrolizador. Escuela técnica superior de ingeniería. Tesis de posgrado. Madrid, España (2012)
- [3] AIE (Agencia Internacional de la Energía); World Energy Outlook 2014 OCDE / AIE, París (2014)
- [4] Michael Ball, Marcel Weeda; The hydrogen economy—vision or reality? International Journal of Hydrogen Energy. 2015 40: 7903-7919.

- [5] O.V. Marchenko, S.V. Solomin; The future energy: Hydrogen versus electricity. *Int. J Hydrogen Energy*. 2015 40: 3801–3805.
- [6] Marco Antonio Rojas Mena; Estudio de factibilidad del uso de hidrógeno como combustible en máquinas de combustión interna para generación de electricidad. Tesis de posgrado, UNAM México (2006).
- [7] L. Tuan, N. Khanh, C. Tai; Simulation study on potential addition of HHO gas in a motorcycle engine using AVL Boost; The 4th AUN/SEED-net regional conference on new and renewable energy (2011).
- [8] V. Knop, A. Benkenida, S. Jay, O. Colin; Modelling of combustion and nitrogen oxide formation in hydrogen-fuelled internal combustion engines within a 3D CFD code. *Int. J Hydrogen Energy*. 2008 33: 5083–5097.

## JUSTIFICACIÓN

Está claro que el hombre está fuertemente arraigado a la búsqueda permanente de fuentes de energía para subsistir. La eficiencia, la eficacia y la viabilidad son tres conceptos que se encuentran ligados en cuanto al tema de sostenibilidad, como los pilares de ésta: economía, medio ambiente y desarrollo social; el emprendimiento hacia un futuro sostenible depende de estos tres conceptos. El desarrollo de prototipos, inventos e innovaciones deben considerar estos rubros, debido a esto, el desarrollo de un electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno mezclado con oxígeno (oxí-hidrógeno) tiene el alcance de establecerse como un medio de producción del portador de energía para cubrir el panorama de la “economía del hidrógeno”, donde el hidrógeno producido mediante fuentes renovables es el protagonista de una visión energética para un futuro cercano. Mediante la producción de hidrógeno en electrolizadores se pretende transitar hacia esa esperada economía energética libre de emisiones de carbono.

## HIPÓTESIS

La respuesta de la curva I-V de los electrolizadores permitirá evaluar el escalamiento y dimensionamiento de potencia del dispositivo, para emplearse en motores de combustión interna. Se considera como variable principal al flujo de corriente, relacionada a la producción de los gases que servirán para el enriquecimiento del combustible de un motor de combustión interna.

## OBJETIVOS

### **Objetivo general:**

Desarrollar y caracterizar un electrolizador alcalino para delimitar su implementación como sistema de enriquecimiento de Diesel, contemplando el escalamiento de potencia.

### **Objetivos específicos:**

- Realizar la caracterización de un electrolizador de referencia mediante curvas de polarización en estado estable.
- Determinar las características y el desempeño eléctrico del electrolizador de referencia.
- Manufacturar y caracterizar el segundo electrolizador alcalino para evaluar su desempeño eléctrico.
- Evaluar ambos sistemas mediante una comparación y determinar una ruta de dimensionamiento.

# CAPÍTULO 1. TECNOLOGÍA DE HIDRÓGENO

En algunos casos de la ciencia todo comienza por el descubrimiento de un evento, invento o elemento a partir de la observación, de forma puramente casual o intuitiva. En la historia de la química, la primera referencia al hidrógeno surge por el descubrimiento del químico inglés Henry Cavendish en el año 1766 en su observación de un gas que se elevaba, al cual llamó “aire inflamable”, producto de la reacción de una mezcla de ácido sulfúrico-zinc. Posteriormente en el siglo XVIII, el químico francés Antoine Lavoisier fue quien demostró que este aire inflamable ardería en el aire para formar agua, identificándolo como un elemento y denominándolo por el nombre que conocemos hoy en día; hidrógeno, que del griego significa “generador de agua” [1].

## 1.1. LA IMPORTANCIA DEL HIDRÓGENO

Hoy, mañana y siempre haremos uso de la energía sin importar la forma en que se encuentre. La inconveniente a esta situación viene dada por la manera en cómo la obtengamos, sabemos hoy en día que la forma convencional es por medio de las materias primas y que así se ha mantenido durante mucho tiempo. Las limitantes de las materias primas en el caso de los combustibles fósiles es que no durarán para siempre y la disminución de la producción continuará en descenso hasta hacer de su extracción una situación crítica. Un ejemplo importante en México es Cantarell, el mayor yacimiento de petróleo que ha disminuido su producción drásticamente desde el 2004, cuando en ese entonces representaba dos tercios de la producción total en el país [2]. Posterior a esa fecha su caída ha sido abrupta; es esta una de las causas que se atribuye el alto costo de los combustibles hoy en día, así como otros factores relacionados a la baja producción y la exportación.

Además de la dificultad de extracción, los políticos energéticos están consciente del daño catastrófico e irreversible que se ha causado al medio ambiente durante largos años y no solo al medio ambiente, sino también en la salud y condición de vida de los humanos; pero que a pesar de los programas para la reducción de partículas contaminantes hacia la atmósfera y los exigentes tratados internacionales, planes y normas de regulación a los vehículos; la pendiente de la razón de cambio entre los métodos de producción de energía libres de carbón y los altos consumos de combustibles fósiles, tienen una diferencia abismal para una aplicación de estos en forma masiva y asequible como para lograr cambiar el panorama energético. Consecuentemente, se expone la situación actual mundial en el sector energético, ambiental y económico, así como el impacto que el hidrógeno puede causar si se plantea como vector de energía, para reconsiderar la relevante importancia en estos tres ámbitos.

### 1.1.1. ENERGÍA

El mundo no se detiene, e indudablemente es posible creer que eso suceda. El consumo mundial de energía es de alrededor de 13,000 millones de toneladas anualmente [3] (equivalentes en toneladas de petróleo). Evidentemente gran parte de este total es empleado para producir energía eléctrica y otra parte se destina para el sector industrial y de transporte, donde la mayoría de tal suministro energético proviene de combustibles fósiles, (carbón, petróleo y gas natural) rondando aproximadamente el 90% de ese total. La energía se destina en su totalidad para el desarrollo de las actividades diarias humanitarias. En la figura 1.1 se puede ilustrar el nivel de consumo energético mundial de lo que ha sido el transcurso de los años hasta el 2015.

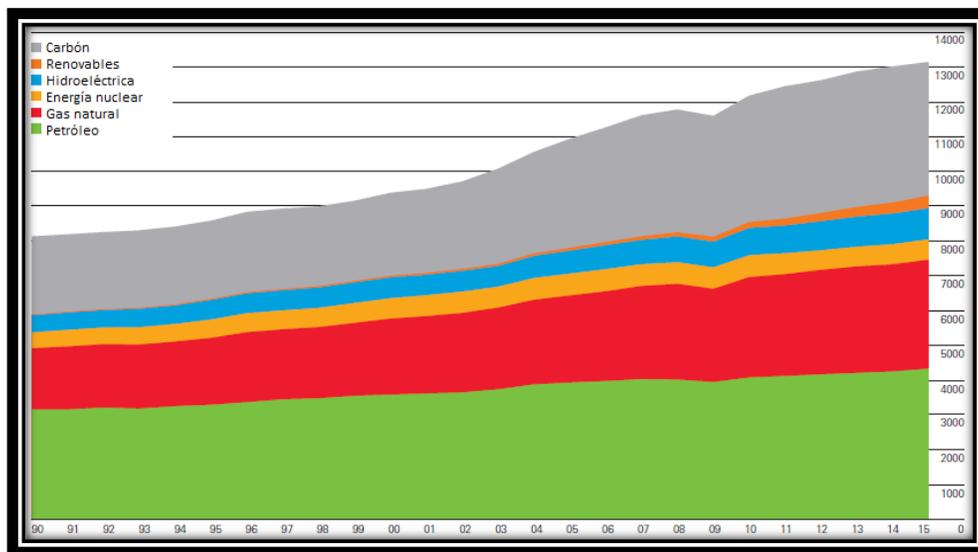


Figura 1.1 Consumo mundial de fuentes de energía en Ton de petróleo equivalente [4].

Como se observa en la figura 1.1 resulta imposible detener o revertir tales niveles de consumo de energía y el principal factor que impulsa la creciente demanda de energía son el rápido crecimiento de la población y el aumento de los ingresos personales (PIB). Además, se espera que esta tendencia continúe incrementándose durante los próximos 20 años. La Agencia Internacional de Energía (AIE) estima que para el año 2050 la población aumentará por encima de 2 mil millones de personas respecto al actual y con ello el consumo mundial de energía se incrementará aproximadamente un 50% [3], la preocupación es, si el suministro de fuentes fósiles actual será capaz de cumplir con ese requisito proyectado.

La crisis energética del petróleo es uno de los sucesos más trágicos que la humanidad ha padecido durante la década de los 70's y que hasta ahora continúa causando estragos. El recorte en el suministro de este combustible y la dependencia de los países desarrollados y subdesarrollados como única fuente energética provocó un giro inesperado en la manera de pensar sobre los hidrocarburos, pues

en su mayoría han dependido de este elemento para satisfacer el consumo energético de su población y como combustible para el sector del transporte.

Se sabe que en el mundo aproximadamente el 90% de las necesidades comerciales de energía son satisfechas por los combustibles fósiles, siendo el petróleo la fuente más importante y el cual es controlado por los países miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) contabilizando aproximadamente el 80% de las reservas mundiales probadas [5]. Este hecho fue el punto de partida para la disminución de la dependencia en el consumo del petróleo y causó una inminente aplicación de medidas para abandonar los hidrocarburos tanto por razones políticas, económicas y ambientales.

Actualmente el mundo conoce las fuentes de energía renovable y ha sido testigo del rápido crecimiento y desarrollo de la generación de energía por este medio. La capacidad de energía renovable instalada a nivel mundial llegó a 1,560 Giga Watts a finales del año 2013, el doble de la cifra de 895 GW en el comienzo del año 2004; y posteriormente durante el 2015 se añadió una estimación de 147 GW de potencia [6]. Sin embargo, cabe mencionar algunas desventajas inherentes al recurso de las fuentes de energías renovables, como para hacer de estas, una esperanza a corto plazo para su aplicación masiva en todo el mundo. Un punto para considerar es la naturaleza intermitente que, debido a esta, las fluctuaciones de este tipo de fuentes indican que la generación de energía es impredecible y cae en un desfase inevitable entre la generación de energía y la demanda. Un segundo punto es que, además de la generación de energía por medios renovables, está la necesidad de abastecer o almacenar esta energía cuando exista un exceso por la fluctuación del recurso renovable excedente.

Actualmente hay un gran esfuerzo que se está realizando en cuanto a los mecanismos de almacenamiento de energía para aumentar la eficacia y eficiencia de los métodos existentes (hidro-bombeo, aire comprimido, volantes de inercia, baterías y condensadores) [7,8]. Para cubrir este rubro debe considerarse un medio de almacenamiento que muestre factibilidad al momento de la conservación energética y claramente que no emita contaminantes a la atmósfera. El hidrógeno es un postulante como medio de almacenamiento, el cual se espera que desempeñe un importante papel junto con las celdas de combustible para hacer frente a la necesidad de fuentes alternativas de combustible limpio y sostenible para un próximo futuro.

En el apartado 1.2 se detalla con más información sobre cómo puede actuar el hidrógeno en esta emergente situación de introducir y abatir a las fuentes tradicionales de combustibles fósiles en el ámbito energético. Mientras que en el siguiente texto se describe brevemente la situación atmosférica y los efectos secundarios por el uso exhaustivo de los combustibles basados en carbón.

### **1.1.2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE**

Actualmente, el planeta atraviesa un periodo de crisis alarmante que se ha desencadenado por la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera como dióxido de carbono, dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, amoníaco y partículas sólidas ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$  y  $PS$ ) los cuales han sido determinados como los propiciadores del aumento en la temperatura de la tierra, en otras palabras, el calentamiento global [9,10]. Este último efecto es debido a la cantidad de gases que se encuentran presente alrededor de la atmósfera cubriéndola en mayor medida, actuando como una especie de polarizado (película opaca sobre una superficie transparente), al cual denominamos “efecto invernadero” y que, consecuentemente está favoreciendo a otro fenómeno llamado “cambio climático” resultando, todo esto a su vez, en una inminente contaminación del aire que respiramos.

La situación de este problema se originó desde la aparición de las industrias manufactureras y productoras, en donde el auge fue debido al descubrimiento del carbón mineral, a partir del cual se intensificó el desarrollo tecnológico, económico y social, trascendiendo en lo que es el actual sector energético basado en combustibles de origen fósil. Este último es, con mucho, la mayor fuente de contaminación atmosférica por consecuencia de la actividad humana. Procedente principalmente de la combustión de hidrocarburos y bioenergía; pero también de la extracción de carbón y otras formas de minería (tierras petrolíferas, uranio, etc.), actividades industriales como procesamiento/lavado de carbón, producción y refinado de petróleo/gas natural, así como las emisiones de escape y no-escape del sector del transporte (desgaste de neumáticos) por mencionar algunos [9,11]. En la figura 1.2 se ilustran las principales fuentes relacionadas a la contaminación del aire y su participación relacionada con las emisiones contaminantes.

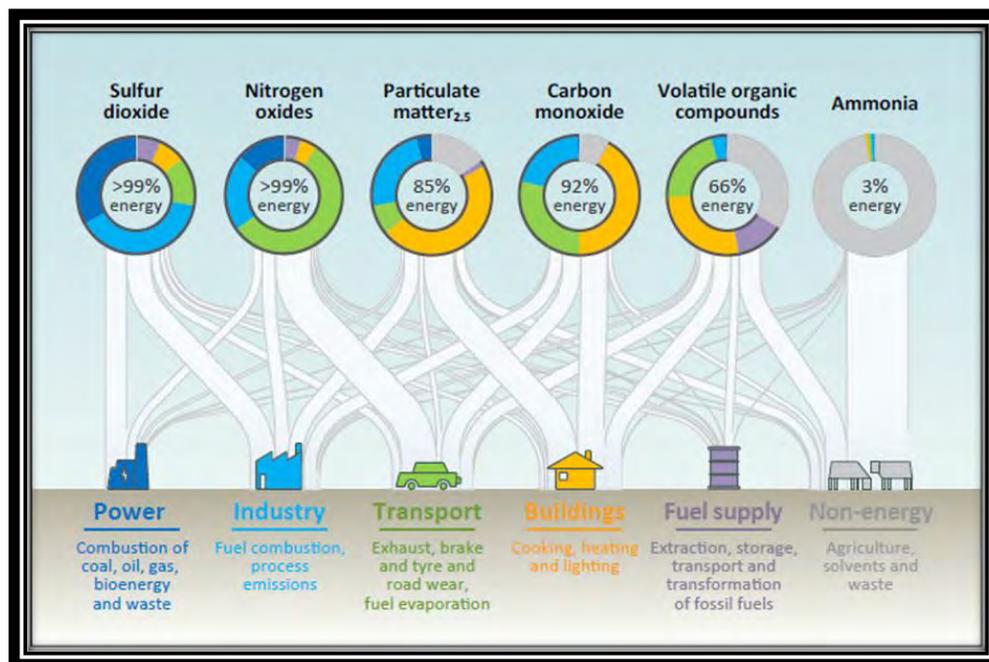


Figura 1.2 Fuentes emisoras relacionadas con la contaminación del aire [9].

Se sabe que la situación atmosférica corre grave peligro a causa de la contaminación, y los seres vivos junto con ella corren el mismo riesgo debido a que el principal escudo que resguarda la tierra de la radiación cósmica se ve perjudicada en gran medida: la capa de ozono. Esta capa está siendo afectada directamente por la emisión de gases contaminantes que causan que se adelgace y se continúe deteriorando. Esta es una de las razones importantes por las que se emiten tratados internacionales para reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera. El primero y más importante es el caso del protocolo de Montreal, el cual fue el determinante para la erradicación de sustancias químicas que destruyen la capa de ozono, los clorofluorocarbonos (CFC) utilizados principalmente en la industria de refrigeración como refrigerantes [12]; posteriormente el protocolo de Kioto, (seguimiento al protocolo de Montreal) el cual impone la reducción de seis gases de efecto invernadero (dióxido de carbono ( $CO_2$ ), gas metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ )) en un porcentaje de al menos un 5% como mínimo en un periodo a corto plazo [13]; y el más actual, el COP 21 (cumbre de naciones unidas sobre el cambio climático) actual sustituto al protocolo de Kioto en la lucha contra el cambio climático, donde el principal objetivo es mantener la temperatura media del mundo por debajo de 2°C [14].

A nivel mundial, las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) son relacionadas en mayor medida a la energía y el transporte, debido a que estas cifras no cesan. En el año 2015, el transporte representó la mayor cantidad en este tipo de emisiones (más del 50%), seguido por la industria (26%) y la energía (14%). En ese mismo año el sector de la energía fue responsable de más de 80 millones de toneladas de emisiones de dióxido de azufre ( $SO_2$ ), con más del 45% emitidas por parte de la industria y un tercio del sector eléctrico [9].

Partiendo de la contaminación del aire, el cual es crucial para el desarrollo de la vida y que por ahora se torna gris debido a las concentraciones contaminantes en la atmósfera; donde en particulares puntos del mundo, estos contaminantes exceden la calidad del aire según la Organización Mundial de la Salud (OMS), siendo sustancias químicas, hollín u otras sustancias introducidas en la atmósfera; donde, la AIE, en su reporte "Energy and Air Pollution" indica que al alrededor de 6.5 millones de muertes prematuras son atribuidas a la mala calidad del aire [9]. Todo esto es debido a que en las grandes ciudades se concentra principalmente la actividad económica, que demanda constantes servicios energéticos, lo que origina que se generen grandes cantidades de emisiones contaminantes a un ritmo elevado, y que por ende tienden a experimentar una concentración masiva de sustancias nocivas, que conducen a reducir la calidad y la cantidad de oxígeno en el aire.

El continuo ritmo acelerado del crecimiento de la población y la masificación en las grandes ciudades, hacen de estos lugares uno de los principales explotadores de recursos naturales y recursos energéticos. A causa de esta explotación han surgido una serie de problemas críticos durante el último siglo, tanto en la forma de vida del

hombre como en el equilibrio de este con la naturaleza los cuales son: la concentración de contaminantes en la atmosfera y la continua emisión de los mismos, la erradicación de ecosistemas naturales por la imposición del urbanismo, así como la contaminación del agua y suelo. Esta situación se seguirá agravando salvo que, esta explotación no se regule o se establezca mediante la sustitución de los recursos energéticos actuales por otros de carácter más amigables con el medio ambiente.

La emisión de contaminantes a la atmosfera no cesará hasta que no sea reemplazado el modelo energético por combustibles libres de carbón. El hidrógeno por su parte no emite contaminación atmosférica alguna, partiendo desde su producción por medio de fuentes renovables hasta su consumo, ya que durante su combustión solo emite vapor de agua al igual que durante la oxidación.

El siguiente texto envuelve la relación que existe entre la energía y la economía, así como el intrínseco enlace con el medio ambiente; estos tres determinantes del futuro próximo por medio de la sostenibilidad.

### 1.1.3. ECONOMÍA

El desarrollo de un país depende de sus recursos propios, principalmente económicos, pero estos a su vez dependen los recursos energéticos disponibles. Es decir; la prosperidad económica de un país está en función de la energía que se suministra, por lo que debe existir como base o pilar para esta prosperidad una estructura energética que sostenga la expansión o desarrollo del país, o mejor sea el caso del mundo.

Con respecto a la prosperidad económica enunciada anteriormente, es aquí donde surge una relación que implica el nivel económico de un país (calidad de vida de los habitantes) respecto al consumo energético. Esta relación se ve representada por la siguiente gráfica.

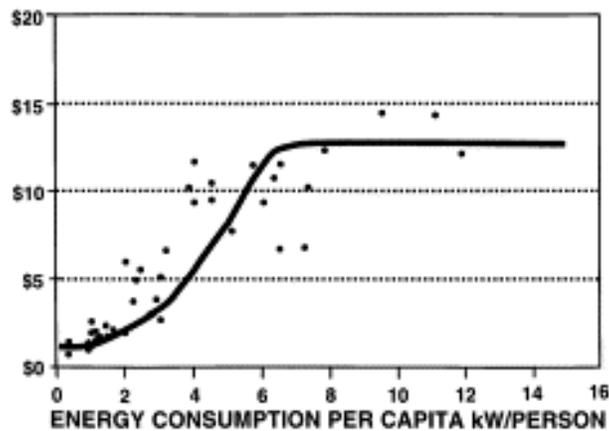


Figura 1.3 Consumo energético per cápita y producto nacional bruto (PNB) [15].

La figura 1.3 muestra que cuando un país tiene poca energía, es decir, un país en desarrollo; los ingresos del producto nacional bruto (PNB) per cápita aumentan con

lentitud a medida que también se introduce poca energía en la sociedad. Luego se observa una gran diferencia de los ingresos con respecto a la energía, este comienza a aumentar exponencialmente con una entrada de energía per cápita menor a 3kW, lo que se traduce que; a medida que un país aumenta su nivel económico, se ve reflejado en un aumento en el consumo energético de los ciudadanos, y es así como se logra el crecimiento o desarrollo de un país. Sin embargo, esta relación llega a un límite en el crecimiento del ingreso per cápita; en el momento en que llega a 6-7 kW por persona, el aumento en el ingreso comienza a desaparecer. Al llegar a los 8 kW por persona, ya no hay aumento en el nivel de vida de los habitantes al continuar incrementando el consumo de energía por persona.

Como se puede notar, la relación entre la economía y la energía son determinantes del crecimiento de los países en desarrollo. Algo muy importante, son las grandes cantidades de energía que se requieren para tener una economía próspera; que actualmente se está realizando mediante el modelo energético de combustibles basados en carbón. Una estrategia de crecimiento sostenible plantea buscar, no solo alternativas energéticas, sino el uso eficiente de estas y contribuir al uso de fuentes renovables.

Actualmente se conoce la influencia y el poder que el petróleo causa, pues este es el principal motor de la economía mundial. Y que, quienes lideran las reservas de petróleo lideran el mundo. Así lo dio a entender la OPEP durante el recorte de este combustible en la década de los 70's [5,16]. A lo que se atribuye las diversas guerras y crisis económicas que han acontecido durante el último siglo; por intentar liderar el oro negro [16]. Debido a que este recurso es empleado principalmente para la cubrir las necesidades energéticas mundiales, donde el papel más importante es mediante la generación de electricidad, seguido del combustible para vehículos y por último para la elaboración de diversos productos, por lo que tiene un importante significado para los líderes mundiales.

A continuación, se describe la estrategia del hidrógeno como posible fuente inagotable de energía y respetable ambientalmente para desempeñar el papel de base energética de una futura prosperidad económica que se denomina "economía del hidrógeno".

## **1.2. HIDRÓGENO, PORTADOR DE ENERGÍA**

Un combustible alternativo debe ser factible técnicamente, competitivo económicamente, aceptable ambientalmente y de fácil disponibilidad [7]. El hidrógeno es visto por la industria, el sector transporte y espacial como uno de los posibles combustibles alternativos, y por muchos científicos como el combustible del mañana. Debido a que, desde su descubrimiento ha destacado como un elemento con excelentes propiedades al ser comparado frente a los combustibles comunes como gasolina, diésel, metanol, y entre otros. Esto es debido por la

singularidad del alto contenido energético interno que posee, añadiendo la particularidad de poder encontrarse en abundancia en el universo (en un 75%). Se sabe que en condiciones normales (273.15 K y 1 atm) este gas es incoloro, inodoro, insípido, no tóxico e insoluble al agua. Su número atómico es la unidad y tiene una masa molecular de 1.00794 *uma*, así como el coeficiente de difusión para las mismas condiciones es de 0.61  $cm^2/s$ , pudiéndose disipar hasta 3.8 veces más rápido que el gas natural [17,18]. Algunas propiedades del hidrógeno se enlistan en la tabla 1.1.

*Tabla 1.1 Propiedades físicas y químicas del hidrógeno.*

Propiedades físicas y químicas del hidrógeno		
Forma cristalina	Hexagonal	
Punto de fusión	-259.1 °C	
Punto de ebullición	-252.7 °C	
Temperatura crítica	-239.8 °C	
Densidad en líquido	0.0709 g/cm <sup>3</sup>	
Densidad en gas	0.0899 kg/m <sup>3</sup>	
Masa atómica	1.00794 kg/mol	
Isótopos y abundancias	H-1	
	H-2 (deuterio)	0.99985%
	H-3 (tritio)	0.00015%

El hidrógeno presenta gran inflamabilidad y arde en concentraciones muy bajas mezclado con aire o en presencia de un oxidante (4.1% para el límite inferior de inflamabilidad), mientras que la temperatura de autoignición para una estequiometría en aire está entre 773 a 850 K y en oxígeno entre 773 y 833 K. En cuanto a la mínima energía de chispa requerida para incendiar el hidrógeno es de 0.017 *mJ*, considerablemente inferior que la del metano (0.29 *mJ*) o de la gasolina (0.24 *mJ*) para 1 atm [17,18].

Además de que la combustión de este proporciona agua como residuo en forma de vapor y la oxidación proporciona energía eléctrica sin poner en riesgo el medio ambiente o la salud de los seres vivos. La tabla 1.2 muestra alguno de los valores gravimétricos y volumétricos del hidrógeno comparado con los combustibles tradicionales. Donde se puede apreciar las altas cifras de energía gravimétrica del hidrógeno en comparación con los combustibles comunes, así como también la desventaja que tiene este mismo en energía volumétrica.

Tabla 1.2 Valores gravimétricos y volumétricos de hidrógeno y combustibles fósiles comunes [19].

Combustible	Energía por kilogramo (MJ/kg)	Energía por litro (MJ/L)
Hidrógeno (líquido)	143	10.1
Hidrógeno (comprimido, 700 bar)	143	5.6
Hidrógeno (presión ambiente)	143	0.0107
Metano (presión ambiente)	55.6	0.0378
Gas natural (líquido)	53.6	22.2
Gas natural (comprimido, 250 bar)	53.6	9
Gas natural	53.6	0.0364
GLP propano	49.6	25.3
GLP butano	49.1	27.7
Gasolina (petróleo)	46.4	34.2
Aceite de biodiesel	42.2	33
Diésel	45.4	34.6

Una de las estrategias más importante del hidrógeno es cambiar el panorama energético actual contribuyendo a reducir las emisiones al máximo, proveer un medio ambiente más benigno y con ello un sistema energético más limpio y sostenible. La forma de lograrlo es mediante la esperada “economía del hidrógeno”, un ciclo donde este elemento es utilizado para almacenar y transportar energía; concibiéndose ser producido por fuentes renovables desde los lugares más remotos y transportado para abastecer los diversos puntos de consumo.

Para que esto ocurra, primero debe plantearse la base del desarrollo tecnológico de este escenario sostenible. Donde se espera que su alcance sea a largo plazo, pero una transición a corto plazo podría resultar con la utilización de diversas fuentes de producción de hidrógeno que van desde los métodos no renovables hasta los renovables; así como la intensificación en los métodos de almacenamiento de hidrógeno que resulta el principal problema [1, 10, 15].

La figura 1.4 muestra un ejemplo del rol que puede tener el hidrógeno en esta visión de contribuir a reducir las emisiones de carbón y sustituir el actual modelo energético. En la imagen se ilustran las diversas formas de energía por las cuales se puede producir el hidrógeno tanto renovables como no renovables, consecuentemente una vez producido el hidrógeno se destina a ser almacenado ya sea en alguna de sus tres fases y finalmente transformarse en energía eléctrica mediante una celda de combustible para proveer energía a los distintos fines de consumo.

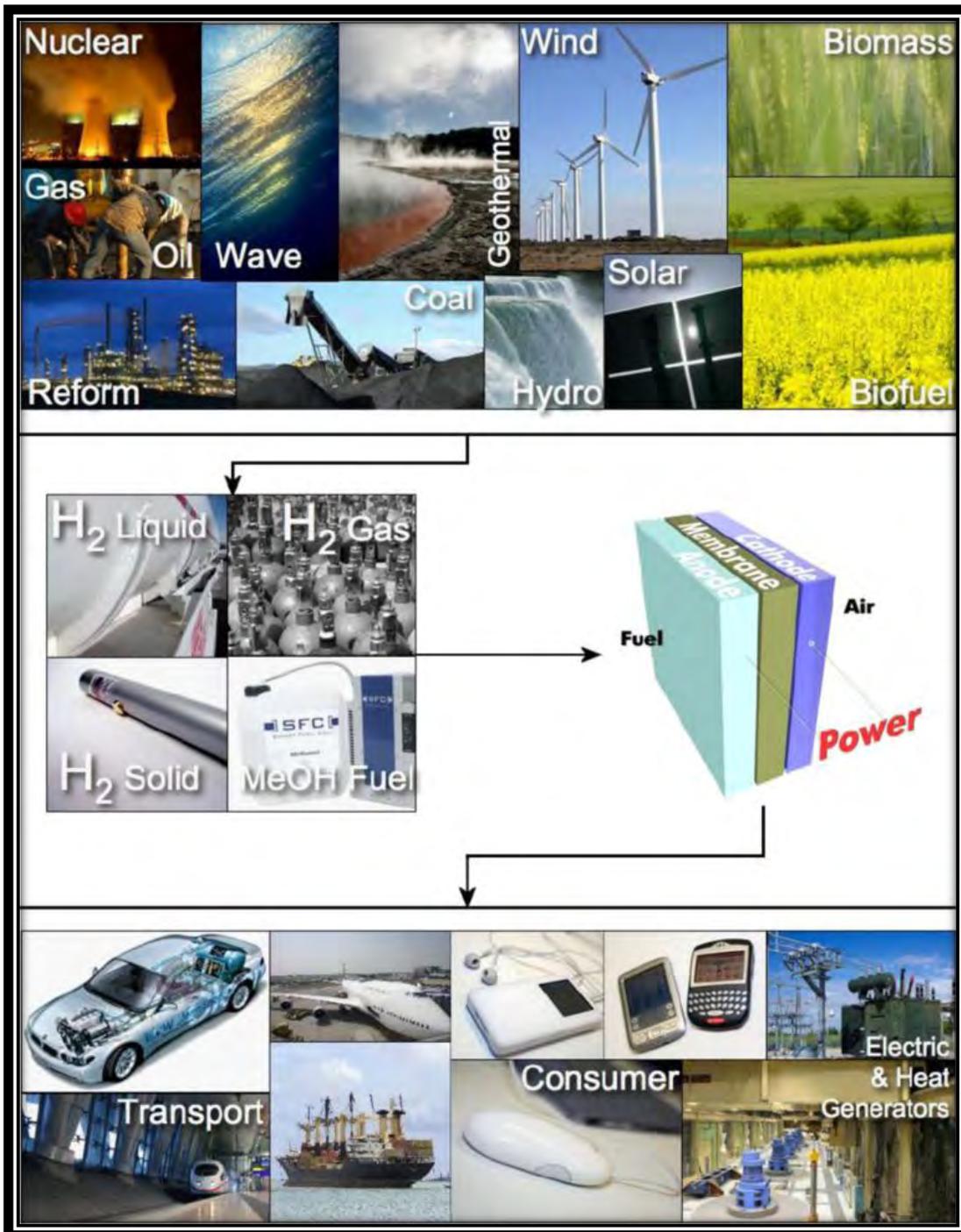


Figura 1.4 Visión del hidrógeno como vector de energía; producción, almacenamiento y uso final [13].

La sección siguiente menciona las aplicaciones más características del hidrógeno y los posibles campos donde está adquiriendo gran atención por diversos sectores en su utilización.

## 1.2.1. APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

Actualmente el consumo de hidrógeno asciende a más de 50 millones de toneladas métricas en el mundo, según el último registro en el 2006, donde es utilizado mayormente para el refinado de petróleo, seguido por la producción de amoniaco, y en menor medida en el refinado de metal, tal como níquel, tungsteno, molibdeno, cobre, zinc, uranio y plomo por mencionar algunos ejemplos [7, 21, 22]. Además del consumo industrial se tiene la participación del sector químico y alimenticio donde participa en la sinterización e hidrogenación de diversos productos. Este elemento juega un papel muy importante en cuestiones energéticas, ya que es un medio de obtención de energía tanto eléctrica como térmica en cualquier aplicación que se requiera.

### 1.2.1.1. IMPLEMENTACIÓN EN MOTORES TÉRMICOS.

Un interés muy práctico del hidrógeno que ha ganado mucha atención es la sustitución/enriquecimiento de combustibles convencionales (gasolina, gas y diésel) por medio de hidrógeno, ya sea de forma pura o como oxi-hidrógeno. Esto con la finalidad de ahorrar combustible y aumentar la potencia del motor que se desea emplear.

En comparación con los combustibles fósiles, tales como gasolina, diésel y gas natural, el hidrógeno tiene ventajas de inflamabilidad más amplia, rápida velocidad de propagación de la llama, energía de encendido inferior, y una tasa de difusión más rápida, que hacen que este elemento sea sumamente considerado en el empleo de diferentes motores térmicos gracias a las propiedades inflamables únicas como combustible [22]. Principalmente por la alta velocidad de la llama y la temperatura adiabática que tienden a elevar la velocidad de la combustión. Esta característica de combustión rápida permite altas velocidades durante la operación del motor, traducido de otra manera: quema mucho más rápido el combustible y eleva el número de ciclos o revoluciones por minuto aumentando la potencia considerablemente [23]. Además, la eficiencia del motor a velocidad constante aumenta con una pequeña tasa de flujo con suplemento de hidrógeno y ayuda a disminuir las emisiones de  $CO$ . Una cantidad relativamente pequeña de hidrógeno combinado con combustible convencional puede mejorar la combustión, el consumo de combustible y las emisiones, que se traduce como una utilización más eficiente del combustible tradicional [23]. Sin embargo, debido a que el valor del calor de la mezcla de hidrógeno puro es más bajo que la de la gasolina; el hidrógeno en almacenamiento a bordo es un problema que aún no se ha superado, por lo que la aplicación de hidrógeno en el coche es todavía difícil.

Diversos métodos experimentales se han realizado en diversos motores y vehículos intentando comprobar la eficacia como combustible. Para el caso de motores de gasolina ha habido varios, uno de ellos ha experimentado variados ensayos que comprueban que este método reduce la cantidad de  $CO_2$  comparado con el combustible tradicional hasta un 57% pero se incrementa la cantidad de  $NO_x$

producida por combustible con  $H_2$ . Se trata del RX-8 Hydrogen RE, un vehículo de motor rotativo que utiliza hidrógeno como energía limpia [24]. Dicho vehículo se equipó con un dispositivo que monitoreaba la eficiencia del combustible sobre la base de la norma ISO14040. El hidrógeno usado fue el subproducto obtenido de un electrolizador alcalino (EA).



*Figura 1.5 Motor rotativo empleado para el uso de hidrógeno [24].*

La mezcla de hidrógeno y oxígeno que se genera en el electrolizador alcalino (oxi-hidrógeno) puede incrementar la potencia de motores de combustión interna mediante enriquecimiento del combustible, si se agrega de un 5% a un 15% de hidrógeno a la gasolina, por medio de la inyección en el sistema de admisión. Se eleva el octanaje a partir de 80 a 140, lo que da como resultado un incremento considerable en la potencia del motor, además de no presentar residuos de combustión ya que el hidrocarburo mezclado se quema en su totalidad. No hay riesgos en el almacenamiento de este gas debido a que el hidrógeno se genera en el mismo auto y se alimenta al motor conforme se produce, por lo que no se necesita infraestructura para su almacenamiento [25].

Otro de los motores que son muy empleados son los motores diésel, lo cuales son indispensables para el transporte agrícola y de carga. Este tipo de automotores no están exentos a la emisión de contaminantes comparados con los de gasolina, en cambio son más contaminantes al operarlos, por lo que resulta conveniente acelerar la investigación y desarrollo (I+D) para reducir la emisión por parte de estos automotores.

Diversos experimentos también han sido puestos en marcha para los motores de combustible diésel. La investigación en la combustión simultánea de hidrógeno y diésel se ha llevado a cabo con diversas dosis de hidrógeno en el intervalo de 0%

a 17% con respecto al porcentaje de energía. Con hidrógeno al 17%, los resultados de la mezcla estequiométrica de hidrógeno-diésel-aire proporcionó condiciones favorables para la generación de golpe de combustión [26]. Con pequeñas cantidades de hidrógeno añadidas a un motor diésel se disminuyó el tiempo de retardo del encendido diésel y de esta manera, se pretende disminuir la tasa de aumento de presión para evitar la pre-combustión por la cantidad de presión en la cámara de combustión.

Resultados experimentales como el que desarrolló Y. Kagaro, y compañía [27] en su investigación del efecto de la adición de hidrógeno con una pureza del 99.99% a diferentes cargas de un motor diésel mono cilíndrico de 4 tiempos de aspiración natural. Donde introdujo 30% de contenido de energía de hidrógeno de la energía total de combustible (combustible diésel + hidrógeno) con velocidad de operación constante a 1100 RPM. Se ensayó y se comparó con el combustible diésel puro a 40%, 60%, 75% y 100% de la carga del motor que es igual a 1,20 kW, 1,80 kW, 2,25 kW. Se observaron reducciones en emisiones de monóxido y dióxido de carbón como en la eficiencia térmica, sin embargo, el control en el incremento en emisiones de óxido de nitrógeno  $NO_x$  no solo sucede en motores de gasolina, en las figuras 1.6 y 1.7 se ilustran los resultados de respectivas emisiones.

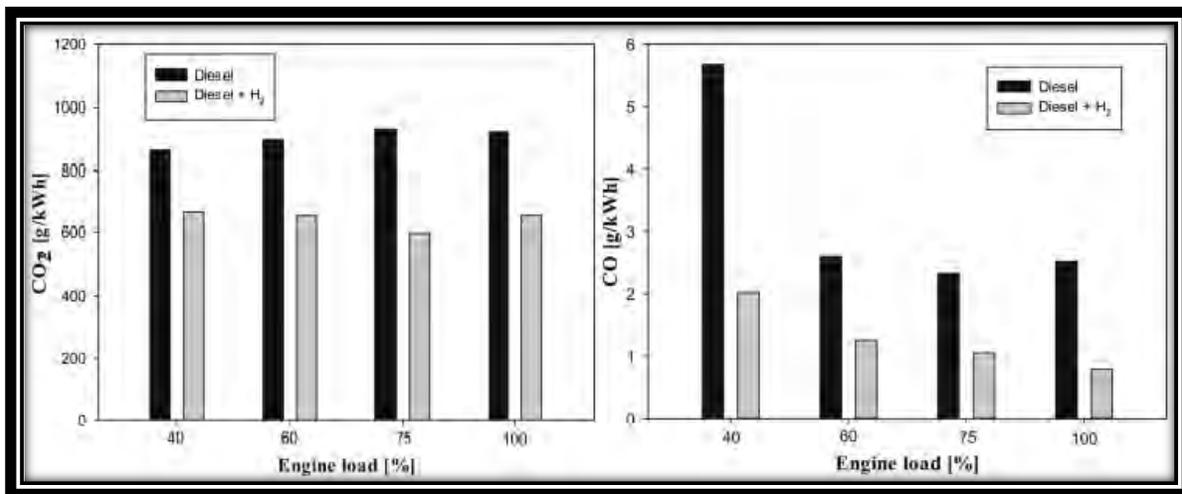


Figura 1.6 Reducción de tasas de monóxido y dióxido de carbón del motor con diésel y diésel con hidrógeno al 30% [27].

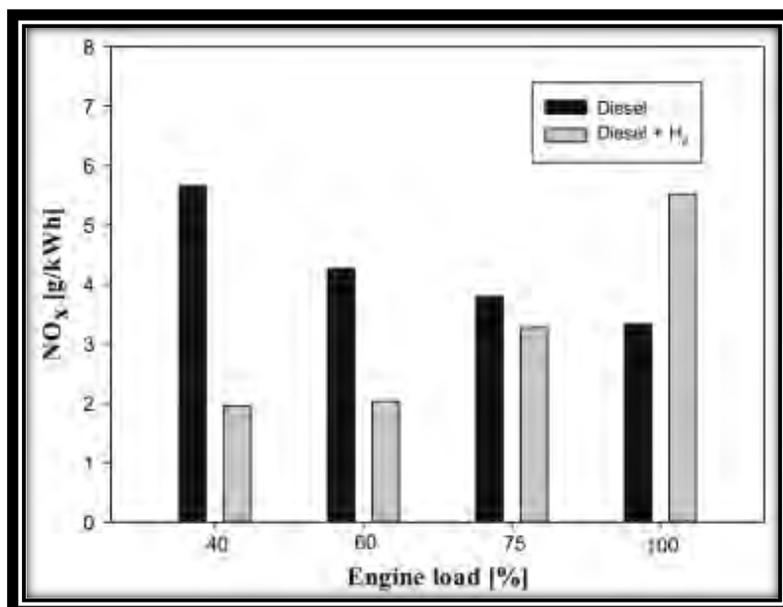


Figura 1.7 Incremento de tasas de óxido de nitrógeno del motor con diésel y diésel con hidrógeno al 30% [27].

Por lo tanto, es necesario encontrar un combustible alternativo adecuado, que sea capaz de trabajar en conjunto con este tipo de combustibles para disminuir el sustancial incremento de  $NO_x$ . El esfuerzo por parte de científicos se ha centrado en la optimización de implementar diversas técnicas para demostrar el potencial uso de este combustible y reducir las emisiones contaminantes de los vehículos e incrementar su eficiencia.

### 1.2.1.2. IMPLEMENTACIÓN EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Una de las aplicaciones del hidrógeno que más promete contribuir hacia la esperada era libre de carbón son las celdas de combustible. Hoy en día son consideradas como pequeñas centrales eléctricas a escala, debido a que tienen la capacidad de ser la fuente de energía de infinidad de dispositivos electrónicos portátiles como teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, tabletas electrónicas y drones; especialmente las mini PEMFC, por su incorporación en sistemas portátiles [28].

Los sistemas de celdas de combustible son dispositivos que convierten la energía química almacenada en el combustible directamente en energía eléctrica. La apuesta por científicos como la tecnología del mañana se debe a su alta eficiencia, baja temperatura, rápida puesta en marcha y principalmente la no emisión de gases contaminantes. Además de que también se pueden emplear en aplicaciones de gran escala, tales como la automoción, energía de reserva para casos de emergencia, sistemas híbridos residenciales/industriales de cogeneración, entre otras.

La figura 1.8 ilustra una representación de una celda unitaria o mono celda y sus componentes fundamentales como son la placa bipolar, ensamble de membrana

electrodos (cátodo, membrana y ánodo), capa difusora de gases y nuevamente la placa bipolar para una posible siguiente celda.

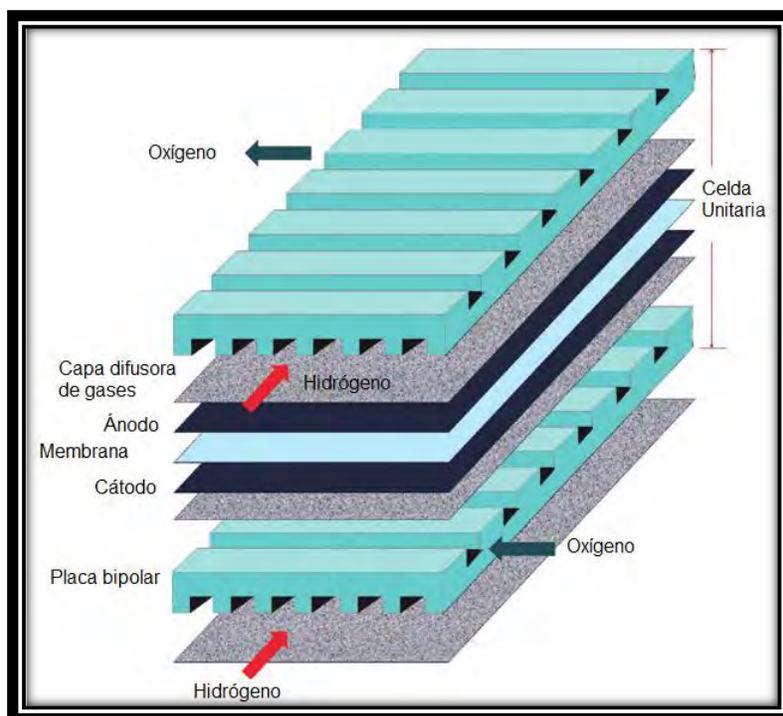


Figura 1.8 Representación esquemática de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones PEMFC [29].

Actualmente, existen seis tipos de celdas de combustible bien establecidos en el mercado. En la tabla 1.3 se enlistan sus especificaciones y algunas características como son el tipo de electrolito empleado, el rango de temperatura de operación y la eficiencia alcanzada:

- Celda de Combustible de Membrana de Intercambio de Protones de la (PEMFC)
- Celda de Combustible de Metanol Directo (DMFC)
- Celda de combustible Alcalina (AFC)
- Celda de combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)
- Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)
- Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)

Tabla 1.3 Especificaciones de las celdas de combustible comunes [7].

Tipo FC	Temperatura (°C)	Reacciones	Electrólito	Eficiencia (%)
PEMFC	60-140	Ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Cátodo: $1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Polímero	55
DMFC	30-80	Ánodo: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	Polímero	30

AFC	150-200	Cátodo: $3\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$ Ánodo: $\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ Cátodo: $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	Hidróxido de potasio	60
PAFC	150-200	Ánodo: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ Cátodo: $1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	Ácido fosfórico	> 40
MCFC	600-700	Ánodo: $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ Cátodo: $1/2\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	Li/K/ carbonato de Na	45
SOFC (+)	200-700	Ánodo: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ Cátodo: $1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	Cerato de bario	40
Amoniaco directo	400-700	Ánodo: $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$ Cátodo: $3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	Cerato de bario	40
SOFC (-)	1000	Ánodo: $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ Cátodo: $1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$	Zirconia estabilizada	40

Las aplicaciones del hidrógeno no tienen límites y actualmente representan solo 3% de consumo total. Para aumentar el uso descentralizado de este elemento es importante contar con una fuente rica y disponible de hidrógeno y que además sea benigna con el medio ambiente. Considerando que este último no está disponible como una fuente de materia prima, y que se encuentra como fuente secundaria de energía como en el caso de la electricidad, se debe producir o extraer de un medio, bien a partir de hidrocarburos o agua.

En la sección siguiente se mencionan los métodos convencionales y novedosos para la producción de hidrógeno, partiendo por los métodos que prometen a largo plazo plantearse como los menos contaminantes y más confiables desde el punto de vista sostenible, hasta los tradicionales; con los que se cuenta actualmente para ser la clave hacia una transición de producción de hidrógeno libre de carbón.

### 1.3. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Aunque este elemento es generalmente considerado como un combustible limpio, es importante reconocer que los pasos involucrados en su producción pueden tener impactos negativos en el medio ambiente en alguno de los procesos y/o métodos existentes actuales. Es fundamental recordar que el hidrógeno no se encuentra disponible en la naturaleza como una materia prima, y para ello, este se tiene que producir a partir de una fuente que lo contenga como parte de sus elementos. Un ejemplo muy característico es el agua, en donde su estructura lo componen dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno, y que para separarlas se requiere cierta cantidad de energía. Hay alrededor de 90 rutas de producción de hidrógeno que se pueden dividir en cuatro categorías: biológicos, químicos, electroquímicos (electrólisis del agua, fotoelectroquímicos, fotocatalisis) y las tecnologías térmicas o termoquímicas [30]. A continuación, se describen algunos de los métodos de

producción de hidrógeno, partiendo de forma descendente por los que se esperan dominen el mercado de producción de hidrógeno a largo plazo, por considerarse ambientalmente limpios o de bajo nivel de emisiones.

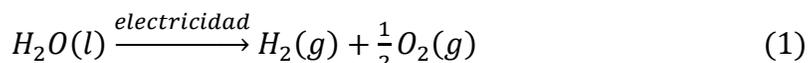
### 1.3.1. PROCESOS ELECTROQUÍMICOS

Principalmente la producción de hidrógeno se desenvuelve mediante la separación de agua en sus dos moléculas, debido a que el planeta se encuentra cubierto de este elemento en un 70% en masa, lo que lo hace un método relativamente accesible y no contaminante. Básicamente en estos tipos de procesos de disociación de agua, la evolución de hidrógeno se realiza por el aporte de energía eléctrica; que bien puede emplearse por fuentes convencionales o fuentes renovables como la luz solar. A continuación, se describen algunos métodos para la obtención de hidrógeno.

#### 1.3.1.1. ELECTRÓLISIS DE AGUA

Una de las posibles rutas para la producción de hidrógeno y de las cuales se espera que sea utilizada ampliamente para la era libre de carbón, es la electrólisis de agua. Donde a través de su producción por fuentes renovables se pretende transitar hacia ese modelo.

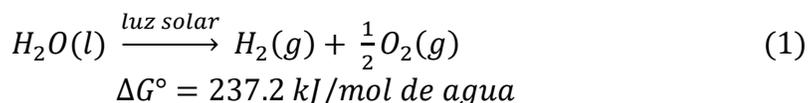
Actualmente, el proceso industrial más básico para la producción de hidrógeno casi puro es la electrólisis del agua, y se espera que aumente en el futuro. La electrólisis del agua se basa en la división de la molécula de agua por la fuerza electromotriz impuesta entre dos electrodos sumergidos en una disolución acuosa. Forzando a crear una reacción no espontánea, red-ox, desprendiendo de entre los electrodos y el agua el hidrógeno y oxígeno en forma de gas. La reacción general es la siguiente:



Las principales tecnologías electroquímicas de producción de hidrógeno por medio de electrólisis son los electrolizadores alcalinos, de membrana polimérica y de óxido sólido. En el capítulo dos se detalla con más información sobre esta destacada tecnología para la producción de hidrógeno puro, por tratarse del tema de estudio en la presente tesis.

#### 1.3.1.2. FOTO-ELECTRÓLISIS

Este método utiliza la irradiación solar para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, al emplear semiconductores fotosensibles en al menos uno de sus dos electrodos inmersos en un electrolito acuoso, de los cuales uno es un fotocatalizador expuesto a la luz solar [31]. Se denomina celda electroquímica (PEC) al lugar donde se realiza la disociación de agua y se desenvuelve por la siguiente reacción.



La celda puede producir ya sea energía química o eléctrica. El principio de funcionamiento del semiconductor en una celda PEC es similar a una celda fotovoltaica. El proceso se puede resumir para un sistema a base de un foto-ánodo como sigue: (i) un fotón con mayor energía que la banda prohibida golpea el ánodo, se crea un par electrón-agujero. (ii) Los agujeros descomponen el agua en la superficie frontal del ánodo para formar iones de hidrógeno y oxígeno gaseoso, mientras los electrones fluyen a través de la parte posterior del ánodo que está conectado eléctricamente al cátodo. (iii) Los iones de hidrógeno pasan a través del electrolito y reaccionan con los electrones en el cátodo para formar gas hidrógeno [32]. (iv) Por último, el oxígeno e hidrógeno son recogidos, para el procesamiento y almacenamiento.

En la literatura, los semiconductores ( $TiO_2$ ) y óxidos metálicos ( $Fe_2O_3$ ) están fuertemente estudiado como fotocatalizadores, así como la intensificación para incrementar la eficiencia de la celda que se encuentra por debajo del 10%. Las reacciones de foto-reducción y de fotooxidación se pueden escribir como.

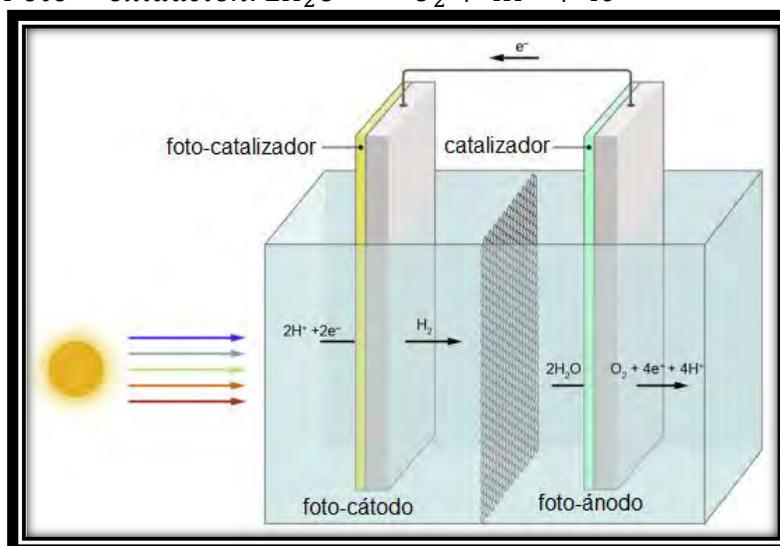
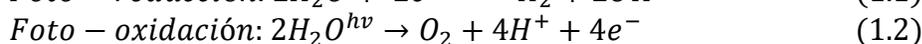
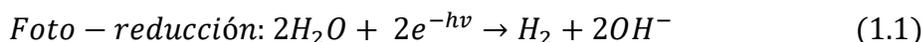


Figura 1.9 Esquema de una celda fotoelectroquímica, el fotocátodo donde el agua se reduce a  $H_2$  y el foto-ánodo donde el agua se oxida para producir  $O_2$  [31].

### 1.3.2. PROCESOS BIOLÓGICOS

Como alternativa también se encuentra presente la producción biológica de hidrógeno. Esta puede desarrollarse por diversos métodos que operan principalmente a una temperatura cercana al ambiente, donde el combustible para este proviene de materias primas renovables como de materiales de desecho. Por lo tanto, el bio-hidrógeno puede considerarse como una promesa para el desarrollo de una economía de hidrógeno verdaderamente respetable con el medio ambiente

y, por lo que es objeto atractivo de investigación para muchos centros y empresas científicas de todo el mundo.

Los principales métodos para la producción biológica de hidrógeno ocurren mediante procesos fermentativos oscuros, foto-fermentativos, reacción de desplazamiento de agua-gas biológico y bio-fotólisis de agua (directa e indirecta). A continuación, se describen las características principales de cada uno de los métodos mencionados.

### **1.3.2.1. FERMENTACIÓN OSCURA**

Mediante este método se desarrolla la conversión de la energía bioquímica almacenada en la materia orgánica a otras formas de energía en ausencia de luz. Utiliza principalmente bacterias anaerobias, aunque también se utilizan algunas algas sobre sustratos ricos en carbohidratos.

Se puede producir teóricamente un máximo de 4 mol de hidrógeno a partir de 1 mol de glucosa con ácido acético como producto final, mientras que durante la práctica se produce un máximo de 2 mol de hidrógeno a partir de 1 mol de glucosa con butirato como producto final [33,34,35]. Se Obtiene un biogás mixto que contiene principalmente hidrógeno y dióxido de carbón ( $H_2, CO_2$ ) pero también pueden contener cantidades menores de metano, monóxido de carbón y sulfuro de hidrógeno ( $CH_4, CO, H_2S$ ) respectivamente, por lo que se requiere una etapa de separación para producir hidrógeno de alta pureza.

### **1.3.2.2. FOTO-FERMENTACIÓN**

La producción de hidrógeno, mediante este método depende de la luz. Las bacterias fotosintéticas como el azufre púrpura, el no-sulfúrico púrpura (PNS) y las bacterias verdes de azufre desarrollan hidrógeno en un proceso catalizado por la nitrogenasa en condiciones deficientes de oxígeno.

En los procesos de foto-fermentación, se ha logrado el rendimiento del 80%. Sin embargo, este proceso tiene tres inconvenientes principales: (i) el uso de la enzima nitrogenasa demanda de alta energía, (ii) baja eficiencia de conversión de energía solar y (iii) la demanda de foto biorreactores anaeróbicos elaborados que cubran grandes áreas [35].

### **1.3.2.3. BIO-REACCIÓN DE DESPLAZAMIENTO AGUA-GAS**

En este tipo de reacción el  $CO$  es oxidado a  $CO_2$  por agua, produciendo hidrógeno. Esta reacción es un paso clave para la producción de hidrógeno a partir de gas de síntesis, que es catalizado por níquel en algunos procesos como el reformado de hidrocarburos pesados y ligeros, ya que maximiza la producción de hidrógeno normalmente durante el paso de monóxido de carbono ( $CO$ ) a dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Una bacteria fotosintética purpura no sulfúrica es capaz de realizar la misma

reacción de desplazamiento agua-gas en condiciones anaeróbicas estándar (1 atm., 25°C).

#### 1.3.2.4. BIO-FOTOLISIS DE AGUA

Este proceso es usualmente llamado bio-fotólisis directa e indirecta. Donde la energía para generar  $H_2$  proviene del catabolismo de compuestos obtenidos a partir de la fotosíntesis y otras fuentes de carbón.

**Bio-fotólisis Directa:** En el proceso de bio-fotólisis dos fotones son los encargados de producir una reducción de  $CO_2$  en agua por un fotosistema (PSI) o la formación de hidrógeno con la presencia de hidrogenasa. En este caso las microalgas, como algas verdes y las cianobacterias contienen hidrogenasa, estas tienen la capacidad de producir hidrógeno. Generalmente se dice que es fotólisis directa cuando los electrones necesarios para la producción de hidrógeno provienen de la oxidación del agua (PSII). Esto es realizado por algas verdes bajo condiciones anaerobias [34].

**Bio-fotólisis Indirecta:** En caso de fotólisis indirecta, sucede cuando los electrones provienen del catabolismo del almidón o de los lípidos obtenidos durante la fotosíntesis y típicamente es a través de cianobacterias. Estas algas son conocidas como algas verdeazuladas y tienen la propiedad única de emplear  $CO_2$  como fuente de carbono para producir sustancias celulares por la energía solar que se convierten en hidrógeno por el uso de nitrogenasa o hidrogenasa [34].

#### 1.3.3. PROCESOS TERMICOS Y TERMOQUÍMICOS

El calor es una fuente de energía muy eficiente por la que también es posible la producción de hidrógeno, y para ello se necesita de grandes gradientes de temperatura para lograr la separación del hidrógeno del elemento que lo contenga. Algunos de los métodos de producción de hidrógeno se encuentran relacionados con procesos químicos mediante catalizadores que mejoran la eficiencia de producción.

##### 1.3.3.1. TERMÓLISIS

También conocida como etapa de disociación térmica única de agua. La reacción requiere una fuente de calor que podría proporcionar temperaturas por encima de 2.500 K. Por ejemplo, a 3000 K y 1 bar, el grado de disociación es de 64%. Uno de los retos de este método de producción es la separación de  $H_2$  y  $O_2$ . Las membranas semi-permeables existentes se pueden utilizar a temperaturas de hasta 2500 K.

##### 1.3.3.2. DIVISIÓN DE AGUA TERMOQUÍMICA

La división de agua termoquímica es una modificación del proceso de termólisis, mediante la combinación de reacciones químicas sin la presencia de un catalizador que reduce significativamente, el requisito de la temperatura es de hasta 900 °C

[34]. En este proceso, el hidrógeno y el oxígeno se producen por separado. Por lo tanto, este método agrava los problemas causados por la alta temperatura y de separación de gas en el proceso de termólisis agua.

Entre los diferentes ciclos termoquímicos, tales como óxido de zinc-zinc, níquel-manganeso ferrita [7], cobre-cloro, el proceso de azufre-yodo (ciclo S-I) tiene la más alta eficiencia del sistema. La complejidad del proceso es la principal desventaja del proceso de azufre-yodo.

### 1.3.3.3. GASIFICACIÓN DE CARBÓN

La gasificación se define por el uso de combustible sólido, como el carbón, la biomasa o de residuos sólidos para producir gas de síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono mezcla), mientras que el reformado utiliza un combustible de fluido, ya sea, en forma gaseosa o líquida. En la gasificación, existe un amplio intervalo de temperatura que se utiliza de entre 300 a 2000 °C, consiste en hacer reaccionar el combustible con un agente de gas, por ejemplo, oxígeno del aire, vapor de agua o su mezcla para producir gas de síntesis. El gas de síntesis incluye hidrógeno que puede ser separado y el  $CO$  que puede ser convertido a  $CO_2$ , a través de desplazamiento agua-gas, liberando más hidrógeno [30-32].

### 1.3.4. REFORMADO DE HIDROCARBUROS

Existen tres técnicas primarias empleadas para producir hidrógeno a partir de fuentes de hidrocarburos: reformado de vapor, oxidación parcial y reformado auto térmico. El proceso de reformado tiene las más altas emisiones de los tres procesos. A continuación, se describen las características más sobresalientes de estos métodos.

**Reformación por vapor de metano (SMR):** Se trata de una conversión catalítica de hidrocarburos ligeros tales como gas natural, que puede ser propano, butano, el biogás, o gas de vertedero, utilizando vapor. El gas natural se desulfura primero para eliminar el azufre que es el principal veneno del catalizador; posteriormente, a una temperatura de entre 700-1100 ° C y a una presión de alrededor de 3-2.5 atm, el vapor se hace reaccionar con el metano para generar monóxido de carbono e hidrógeno. Generalmente, con el fin de aumentar la eficiencia del proceso (ofreciendo casi el 90%), el monóxido de carbono producido pasa a través de la reacción de desplazamiento agua-gas, para aumentar el rendimiento de hidrógeno. El hidrógeno generado comúnmente se purifica usando un proceso de adsorción por presión oscilante (PSA del inglés, Pressure swing adsorption) para eliminar el dióxido de carbono y otros residuos, tales como monóxido de carbono [30-32, 36].

**Oxidación Parcial:** Este proceso consiste en hacer reaccionar el metano a con gas oxígeno (parcialmente oxidado o quemado) para producir monóxido de carbono e hidrógeno a altas temperaturas. Al igual que en el proceso de reformado de vapor, el hidrógeno se hace pasar por un reactor de desplazamiento de agua-gas para

umentar la producción de hidrógeno y finalmente se purifica por el proceso de adsorción por presión oscilante (PSA). Las eficiencias térmicas de los reactores POx con combustible de metano alcanzan valores de 60-75% con temperaturas de funcionamiento mayor a 1000°C [30-32,36].

**Reformado autotérmico:** El reformado auto térmico es una combinación de procesos de reformado con vapor y oxidación parcial. El primero es un proceso altamente endotérmico que requiere un suministro de calor externo eficiente al sistema. Mientras que el otro es un proceso exotérmico que utiliza oxígeno puro o aire para reaccionar térmicamente o catalíticamente.

## REFERENCIAS

- [1] Michael F. Hordeski; *Alternative Fuels-The Future of Hydrogen*, 3th Edition, The Fairmont Press, Inc. (2013) USA.
- [2] Todd M. Johnson, Claudio Alatorre, Zayra Romo, Feng Liu; México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono; Banco Mundial; (2009), Washington DC, USA.
- [3] International Institute for Applied Systems Analysis, *Global Energy Assessment (GEA)*, International Institute for Applied Systems Analysis (2012).
- [4] BP *Statistical Review of World Energy*; BP; (2016) London, UK.
- [5] Armando Barrañón; *La crisis mexicana del petróleo en el escenario de precios altos del petróleo*; página electrónica: razón y palabra; num. 64; última visita abril 2017; <http://www.razonypalabra.org.mx/N/n64/varia/abarranon.html>
- [6] REN21; *Energías Renovables 2016 reporte de la situación mundial*. Secretaría REN21. (2016) París, Francia.
- [7] Fan Zhang et al; *The survey of key technologies in hydrogen energy storage*. *Int. Journal Hydrogen Energy*. 2016 41: 14535-14552.
- [8] Nazim Z. Muradova, T. Nejat Veziroglu; "Green" path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies. *Int. Journal Hydrogen Energy*. 2008 33: 6804-6839.
- [9] *World Energy Outlook special Report; Energy and Air Pollution*. International Energy Agency. (2016), Paris, France.
- [10] Mustafa Balat; *Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems*. *Int. Journal Hydrogen Energy*. 2008 33: 4013-4029.
- [11] *Global Waste Management Outlook*; United Nations Environment Programme; (2015).
- [12] Juan P. Plazas Monrroy; *Los refrigerantes y el medio ambiente*. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Catalunya, (2012) Barcelona, España.
- [13] RES; *Protocolo de Kioto ¿conoces en qué consiste?* *Eco-inteligencia*. Junio 2015 (última vez junio 2017). En línea: <https://www.ecointeligencia.com/2015/06/protocolo-kioto/>
- [14] RES; *Conclusiones sobre la Cumbre del Clima de Paris (COP21)*. *Eco-inteligencia*. Dic. 2015 (última vez junio 2017). En línea: <https://www.ecointeligencia.com/2015/12/conclusiones-paris-cop21/>

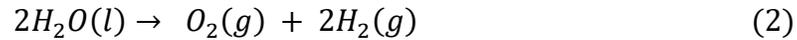
- [15] J. O'M. Bockris; Hydrogen economy in the future. *Int. Journal Hydrogen Energy*. 1999 24: 1-15.
- [16] Stephen Jr. Blanchette; A hydrogen economy and its impact on the world as we know it. *Energy Policy*. 2008 36: 522-530.
- [17] Guillermo A. Sánchez Guillén; Evaluación de electrodos porosos de carbón vítreo reticulado para la producción de gas H<sub>2</sub> mediante electrólisis del agua. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional. 2014.
- [18] Clara F. Bolaños Badía; Energética del hidrógeno contexto, estado actual y perspectivas de futuro. Tesis de grado. Universidad de Sevilla. 2005.
- [19] Kaveh Mazloomi, Chandima Gomes; Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012 16: 3024-3033.
- [20] Sunita Sharma, Sib K. Ghoshal; Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 43: 1151-1158.
- [21] Kai Zeng, Dongke Zhang; Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010 36: 307-326.
- [22] L.M. Das; Hydrogen engine: research and development (R&D) programmes in Indian Institute of Technology (IIT), Delhi. *Int. J Hydrogen Energy*, 2002 27: 963-965.
- [23] Yaodong Du, et al; Research on combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline engine with hydrogen direct-injection. *Int. Journal Hydrogen Energy*. 2016 41: 3240-3248.
- [24] Norihira Wakayamaa, Kenji Morimotoa, et al; Development of Hydrogen Rotary Engine Vehicle. Mazda Motor Corporation. 2006.
- [25] Bernardo A. Grunstein R. y colaboradores; Diseño, construcción y control de un reactor para producción de hidrógeno y su experimentación en motores térmicos. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional. 2015.
- [26] K. Grab-Rogalinski, Stanislaw Szwaja; Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009 34: 4413-4421.
- [27] Y. Karagoz, et al; Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads. *Int. Journal Hydrogen Energy*. 2015
- [28] Kuan-Wen Kuo; Diseño y validación experimental de una celda de combustible de alta densidad de potencia eléctrica. Tesis de grado. Universidad de Quintana Roo. 2016.
- [29] Jurgen Garche, Chris K Dyer; *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Ed. Elsevier B.V. Oxford, UK (2009). Pag. 1629.
- [30] Ibrahim Dincer, Canan Acar; Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *Int. Journal Hydrogen Energy*. 2015 40: 11094-11111.
- [31] Velu Subramani, Angelo Basile, Nejat Veziroglu; *Compendium of Hydrogen Energy Vol. 1: hydrogen production and purification*. Ed. Elsevier, Oxford, UK (2015).
- [32] J.D. Holladay, et al; An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*. 2009 139: 244-260.
- [33] Elif Kirtay; Recent advances in production of hydrogen from biomass. *Energy Conversion and Management*. 2011, 52: 1778-1789.

- [34] Luis M. Gandía, Gurutze Arzamendi, Pedro M. Diéguez; Renewable hydrogen technologies production, purification, storage, applications, and safety. Ed. Elsevier, Poland (2013). Pag. 171-193.
- [35] Meng Ni, Dennis Y.C. Leung, et al; An overview of hydrogen production from biomass. Fuel Processing Technology. 2006, 87: 461-472.
- [36] Pavlos Nikolaidis, Andreas Poullikkas: A comparative overview of hydrogen production processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017, 67: 597-611.

## CAPÍTULO 2. ELECTRÓLISIS ALCALINA

### 2.1. INTRODUCCIÓN

La división del agua ocurre por un proceso electroquímico, en donde la electricidad del tipo corriente directa (DC) fluye a través del líquido de entre dos electrodos, imponiendo una reacción que causa la liberación de sus dos elementos: hidrógeno y oxígeno [1,2]. La reacción general se describe por la siguiente ecuación.



En donde a partir de dos moléculas de agua, estas reaccionan y se disocian para formar una molécula de oxígeno y dos moléculas de hidrógeno. En la figura 2.1 se ilustra el proceso de disociación de agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso se lleva a cabo en un reactor electroquímico conocido como celda, el cual debe contener al menos dos conductores eléctricos denominados electrodos; dentro de esta celda ocurre una transferencia de electrones del cátodo a los cationes (reducción) y una transferencia de electrones de los aniones al ánodo (oxidación). Este tipo de reacción se conoce como una reacción red-ox (reducción-oxidación) no espontánea.

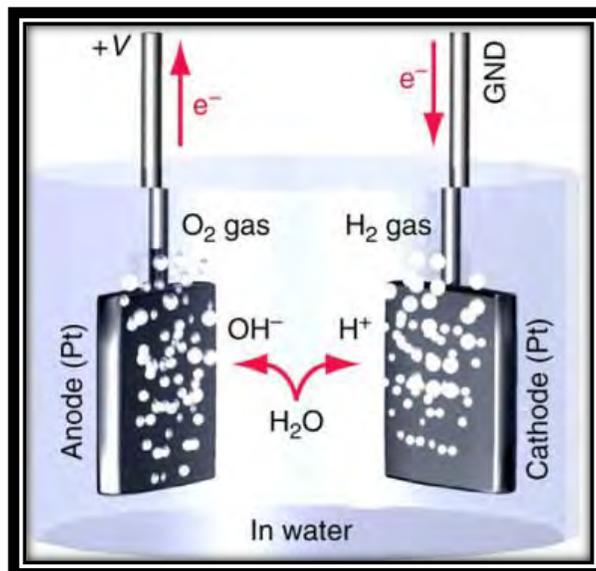


Figura 2.1 Proceso electroquímico del agua, separación de hidrógeno y oxígeno [2].

Las burbujas emitidas durante la reacción corresponden a los gases de hidrógeno y oxígeno liberados. Desarrollar la electrólisis del agua es sencillo y puede resultar ya sea con agua dulce o salada. No obstante, la electrólisis del agua pura es posible, pero a causa de la concentración de iones procedentes de su auto-ionización inferior con lleva a tener un flujo de corriente muy pequeño y la electrólisis resultaría extremadamente lenta; que, en otras palabras, se requeriría aumentar la potencia para que el proceso resulte más efectivo [2]. Para llevar a cabo este tipo de

reacciones es sugerible la adición de electrolitos en agua. Este último, es una sustancia en solución que añade iones (aniones y cationes) a la disolución, que mejoran la conducción de electricidad, proporcionando un ambiente adecuado para el desarrollo electrolítico.

Un ejemplo muy característico de este tipo de electrolito se logra con la disolución de agua con sal común (cloruro de sodio). Lo que ocurre es lo siguiente:

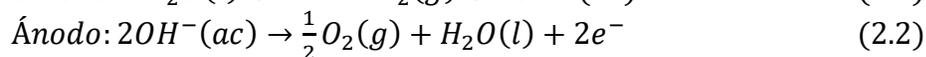
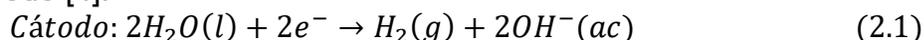


En la reacción, los iones que componen la sal se separan, este proceso se denomina solvatación y es propiamente que los aniones y cationes se separan para rodear las moléculas de agua. El resultado es una solución que ahora contiene iones [3]. Con esto se mejora la conductividad de la electricidad en el seno del agua. Por lo que para efectuar la electrólisis acuosa sin que el proceso se reproduzca a una velocidad muy lenta, se crea un medio de conducción eléctrica con atractivas propiedades de conducción iónica mediante la adición de un electrolito que conduce la electricidad, esto reduce la cantidad de energía empleada en el proceso de la disociación y aumenta la velocidad en las reacciones.

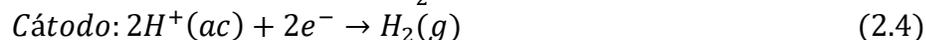
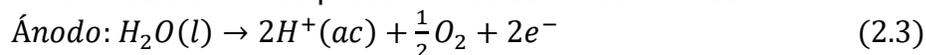
Normalmente la propiedad de mejorar la conductividad iónica para el proceso de electrólisis se puede efectuar por dos tipos de electrolitos:

- Electrolito ácido
- Electrolito alcalino

En el seno del medio alcalino se desarrollan las semi-reacciones correspondientes a cada electrodo [4].



Mientras que en el medio ácido se producen las semi-reacciones:



En donde cualquier medio, las ecuaciones nos devuelve a la ecuación (2). En el apartado 2.2 se describen los tipos de electrolizadores existentes, así como sus características más importantes.

**Antecedente histórico:** La simplicidad para desarrollar la electrólisis de agua indica que esta técnica puede producir hidrógeno puro en grandes cantidades y limpio mediante el uso de fuentes de energía renovables sin la contribución a las emisiones contaminantes. Por lo cual ha atraído gran interés debido al progreso de las celdas de combustible por su infinidad de aplicaciones.

El descubrimiento de la electrólisis de agua surgió accidentalmente por el estudio de la celda electroquímica en el año 1800, cuando el científico inglés William Nicholson y Anthony Carlisle construían una pila, notaron que se desarrollaban burbujas de gas a partir de unas gotas de agua que utilizaban para mejorar el contacto eléctrico entre los cables. Observaron que los gases eran hidrógeno y oxígeno [5]. Unos meses después estos experimentos fueron repetidos por el científico alemán Johann Ritter, quien fue el primero en ser capaz de coleccionar la evolución de hidrógeno y oxígeno separadamente. Después de este importante hallazgo; para que esta tecnología se desarrollara a nivel industrial le tomo alrededor de 100 años producir hidrógeno en diversos países donde la energía hidroeléctrica se encontraba viable comercialmente. Para el año 1900, alrededor de 400 electrolizadores se habían puesto en operación en todo el mundo [6,7].

El primer electrolizador alcalino se desarrolló en el año 1927 para la síntesis de amoníaco por la empresa noruega Norks Hydro Electrolyzes, para el año 1939 la primera planta de producción de  $10,000 Nm^3/h$  de  $H_2$  estaba en funcionamiento. Consecuentemente se pusieron en funcionamiento más unidades, como el primer electrolizador de agua presurizada operado por Zdansky/Lonza. En 1966 el primer electrolizador de electrolito polimérico sólido fue construido por la General Electric Company. Posteriormente en 1972 y 1978 se desarrolló la electrólisis de agua mediante tecnología de óxido sólido [6].

## **2.2. PRINCIPALES TIPOS DE ELECTROLIZADORES**

Los componentes básicos de un electrolizador son comunes para cualquier sistema de electrólisis, donde el principal componente que cambia es el electrolito y se clasifican según el tipo de electrolito que se emplee. Principalmente son: electrolizadores alcalinos (EA), electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM, del inglés Proton Exchange Membrane) y de electrolito de óxido sólido (SOE).

Estos también pueden ser clasificados en dos categorías, según el arreglo empleado para la conexión eléctrica de los electrodos. Uno de estos es el arreglo monopolar o tipo tanque, en donde las caras de los electrodos tienen una sola polaridad, como se ilustra en la figura 2.2. La ventaja en este tipo de arreglo es que las celdas pueden tener electrodos con gran área activa, resultando en elevadas densidades de corriente con bajo voltaje para cada par de electrodos, el cual será el mismo voltaje para toda la celda.

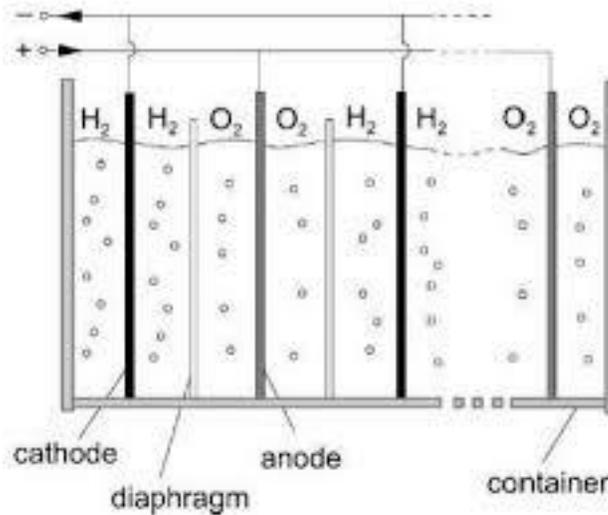


Figura 2.2 Electrolizador monopolar o tipo tanque.

El segundo arreglo es denominado bipolar o tipo filtro prensa, donde los electrodos tienen ambas polaridades adyacentes, es decir; tienen una cara con polaridad positiva y en la otra cara con polaridad negativa, ver figura 2.3. En este arreglo se pueden colocar un gran número de placas, en donde se pueden separar por medio de un diafragma para separar los gases y un aislante que evite un posible corto circuito. El voltaje global será la suma de los voltajes de las celdas individuales que se encuentren en esta.

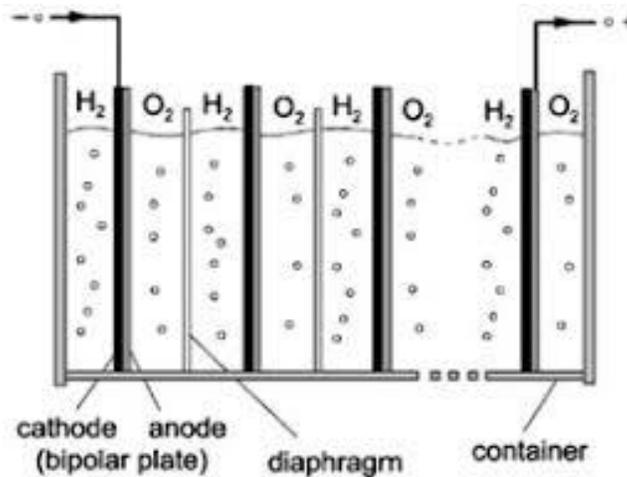


Figura 2.3 Electrolizador bipolar o tipo filtro prensa.

Estas diferencias en la conexión eléctrica definen el voltaje de alimentación de la celda, es decir, mientras las celdas monopolares requieren alrededor de 2.2 v, las celdas bipolares necesitan  $2.2(n-1)$  v donde n es el número de electrodos presentes en la celda [8]. Algunas de las ventajas y desventajas de estos tipos de arreglos se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Diferencias entre celdas monopolares y bipolares.

	Celdas monopolares	Celdas bipolares
Ventajas	<p>Sin “corrientes parásitas” en el sistema. Sin necesidad de bombas o filtros en el sistema. Simple extracción del gas producido. Pocas superficies con uniones. Diseño simple y durable.</p>	<p>Densidades de corriente más elevadas Voltaje de celda más bajos. Presiones y temperaturas más elevadas. Distancia entre electrodos mucho menor. Mejor control de la temperatura y nivel del electrolito.</p>
Desventajas	<p>Dificultad para lograr distancias pequeñas entre los electrodos.  Elevado consumo de energía por caída de potencial debido al tamaño del equipo.</p>	<p>Requiere de un diseño y manufactura sofisticados.  Reducción de la eficiencia por corrientes parásitas en el sistema.</p>
	<p>Presión y temperatura de la celda limitados al diseño mecánico.</p>	<p>Equipo de bombeo, filtración, enfriamiento y separación de gases necesarios.</p>
	<p>Supervisión continua de la temperatura, nivel de electrolito y pureza del gas.</p>	<p>La reparación de una unidad de la celda requiere el desmantelamiento de la unidad completa.</p>

A continuación, se describen las características más relevantes de cada uno de estos electrolizadores.

### 2.2.1. ELECTROLIZADOR ALCALINO

Un electrolizador alcalino es el dispositivo que reproduce la electrólisis de agua en el seno de un medio de conducción de segunda especie, es decir, un medio alcalino. Lo componen un par de electrodos, ánodo y cátodo, y entre estos el electrolito; aunque para casos industriales se emplea una membrana que separa los gases. La producción de hidrógeno mediante electrolizadores alcalinos es una tecnología madura, siendo el estándar actual para la producción a gran escala de hidrógeno, alcanzando una pureza de 99.8%. Celdas convencionales operan a voltajes de 1.8-2.2 V, con densidades de corriente alrededor de 0.4 Acm<sup>-2</sup>, mientras que electrolizadores más avanzados alcanzan los 1.6 V en operación y densidades de corriente elevadas por el orden de 2 Acm<sup>-2</sup>.

**Electrodos:** Comúnmente este tipo de electrolizador emplea como materiales de electrodo placas de acero, debido a la alta corrosividad del electrolito lo cual hace que exista pocos materiales para electrodos, ya que entre las principales características que deben tener es alta resistividad a la corrosión además de buena conducción de electricidad. Estudios mencionan que las aleaciones de acero con níquel, es decir, el recubrimiento de acero con níquel con alta porosidad mejora la

cinética de transferencia de carga y aceleran la tasa de reacciones, los cuales son denominados Raney níquel.

La cinética de la Reacción de Evolución de Hidrógeno y Oxígeno (REH y REO, respectivamente) dependen fuertemente de la actividad de electrocátalisis en el estudio de electrodos con el fin de reducir la cantidad de energía de activación. Algunos de estos estudios demuestran que los electrodos activados con sulfuro de níquel pueden reducir drásticamente el sobre potencial de 250 a 125  $mV$  comparado con el acero, a una densidad de corriente de 250  $mA/cm^2$  [9].

Los electrodos Raney níquel sirven como materiales de alto rendimiento para la REH en el cátodo y han sido empleados durante décadas en electrolizadores alcalinos. La estructura de níquel poroso tiene gran área superficial, que resulta en alta actividad catalítica. En recientes experimentos se han utilizado varias combinaciones de metales de transición como materiales catódicos, tales como  $Pt_2Mo$ ,  $Hf_2Fe$  y  $TiPt$ , el resultado es significativamente mayor a los electrodos comunes.

Mientras tanto, con el objetivo de reducir el sobrepotencial en el ánodo, se han investigado gran cantidad de óxidos mixtos, pero desafortunadamente pocos electro-catalizadores con suficiente estabilidad a largo plazo y costo aceptable han sido identificado. El óxido de rutenio ( $RuO_2$ ) muestra alta actividad hacia REO en el medio ácido y alcalino, pero es inestable bajo las condiciones de electrólisis alcalina. Se han empleado algunos óxidos mixtos que contienen níquel y cobalto, como ( $LaNiO_3$ ) y ( $NiCo_2O_4$ ) como electro-catalizadores en medios alcalinos. Sin embargo, para aplicaciones industriales el Raney níquel sigue siendo la opción preferida.

**Electrolito:** Estos electrolizadores emplean una solución alcalina acuosa, la cual puede ser hidróxido de potasio con una concentración típica de 20-40% en peso o hidróxido de sodio con una concentración de 5-30% que básicamente se encuentra circulando a través de las celdas. La temperatura operacional típica es entre 70 y 90 °C a presiones atmosféricas para el mayor de los casos, pero en sistemas comerciales opera con presiones mayores a 3  $Mpa$ .

Para ambos lados de los gases del electrolizador son separados por un diafragma o membrana impermeable. Uno de los primeros materiales que se utilizaron como separadores o diafragmas para el sistema de electrolisis fueron desarrollados a partir de asbesto, llamado "crisolito" (traducido del inglés, Chrysolite) también conocido como "asbesto blanco" pero actualmente se encuentran prohibidas por regulaciones de salud.

Actualmente se han desarrollado una gran variedad de separadores poliméricos, que además de separar los gases producidos actúan como electrolito promoviendo el intercambio de iones desde el ánodo hacia el cátodo y viceversa, proporcionando el desarrollo de esta tecnología.

En la figura 2.4 podemos observar un electrolizador alcalino y las partes que lo conforman.

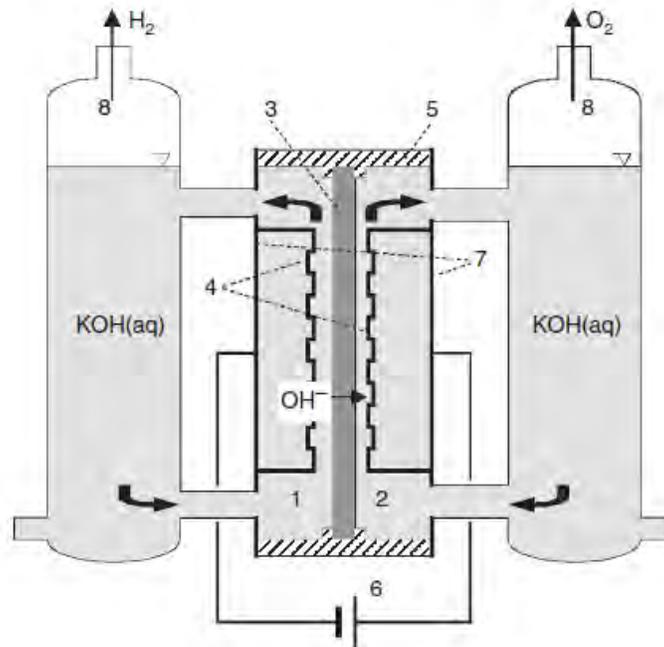


Figura 2.4 Diagrama esquemático de un electrolizador alcalino: (1) sección del ánodo, (2) sección del cátodo, (3) diafragma, (4) electrodos, (5) marco de celda, (6) fuente de poder DC, (7) placas finales, (8) separadores de gas [9].

### 2.2.2. ELECTROLIZADORES PEM

A diferencia de un electrolizador alcalino, el electrolizador PEM utiliza como electrolito o medio de conducción una membrana conductora de iones a la que se le atribuye el nombre.

El impulso de esta tecnología está relacionado con el desarrollo de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), ya que emplea la misma tecnología de membranas de intercambio de protones. Esta membrana es un polímero sólido ácido empleado con el doble propósito de transportar cargas iónicas entre el ánodo y el cátodo y separar los productos formados en cada electrodo ( $H_2$  y  $O_2$ ), fue descrita y patentada en el año 1970 por la empresa General Electric (GE). La celda se alimenta solo de agua desionizada sin la adición de ningún electrolito, es una de las grandes ventajas de esta tecnología.

El diseño fundamental de una celda electrolizadora PEM se muestra en la figura 2.5, puede observarse que el diseño es similar a una celda de combustible PEM.

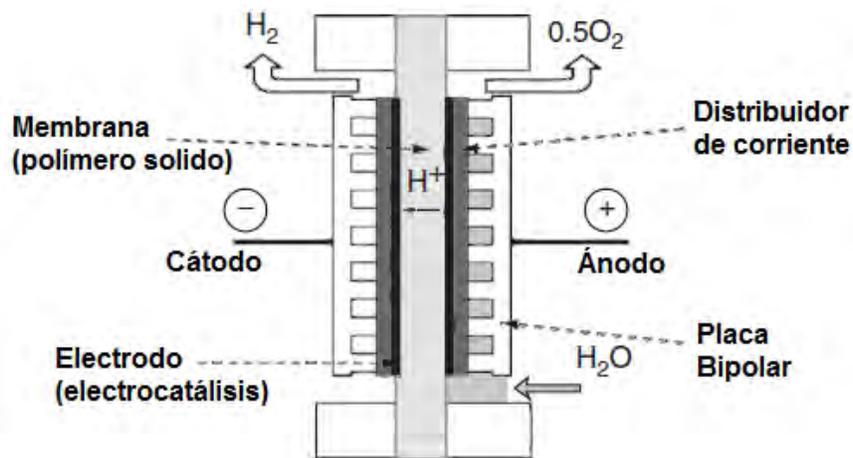


Figura 2.5 Representación esquemática de una celda electrolizadora PEM.

Las dos medias reacciones son separadas por la membrana. Los electrodos se encuentran directamente cubiertos por la membrana y recibe el nombre de ensamble membrana-electrodo (MEA del inglés Membrane-Electrode Assembly). Colectores de corriente porosos son usados para permitir el flujo de corriente eléctrica entre las placas bipolares y los electrodos y, simultáneamente, la evacuación de las burbujas de gas generadas de los electrodos. La pureza del gas de hidrógeno producido alcanza valores por encima de 99.99%.

### 2.2.3. ELECTROLIZADORES DE ÓXIDO SÓLIDO (SOE)

La electrólisis de alta temperatura es un método donde el vapor se disocia en hidrógeno y oxígeno a temperaturas entre 700 y 1000 °C. Este método se considera generalmente más eficiente que la electrólisis que se practica a temperatura ambiente (la eficiencia aumenta al incrementarse la temperatura).

En este tipo de electrólisis, el agua se convierte en vapor mediante el uso de energía térmica. Los principales componentes del sistema se calientan ya sea directamente por el suministro de vapor o indirectamente por transferencia de calor. Por lo tanto, el requerimiento de energía eléctrica de este tipo de electrólisis es inferior a la de los métodos de electrólisis convencionales, otra ventaja de este método es la posibilidad de lograr cero emisiones de gases de efecto invernadero cuando se utiliza una fuente de calor limpio (es decir, solar, energía geotérmica, y/o nuclear) como fuente de calor externa. Sin embargo, debido a altas temperaturas de funcionamiento, los componentes del sistema tienen que cumplir requisitos específicos para una generación de hidrógeno eficiente.

Algunos de los retos actuales que enfrenta la electrólisis de alta temperatura son: (i) el desarrollo de un electrolito químicamente estable con alta conductividad iónica, (ii) la investigación de electrodos porosos químicamente estables en entornos oxidantes con buena conductividad electrónica y el coeficiente de expansión térmica similar al electrolito, y (iii) la ingeniería de materiales químicamente estables a altas

temperaturas y altamente reductora en ambientes oxidantes. En la tabla 2.2 se enlistan y se compraran algunas de las notables características singulares de los electrolizadores ya mencionados.

*Tabla 2.2 Especificaciones de electrolizador alcalino, PEM y SOE [10].*

Especificación	Alcalino	PEM	SOE
Madurez de la tecnología	Lo último	Demostración	I + D
Temperatura de la celda. (°C)	60-80	50-80	900-1000
Presión de la celda. (Bar)	<30	<30	<30
Densidad de corriente. (A/cm <sup>2</sup> )	0.2-0.4	0.6-2.0	0.3-1.0
Voltaje de la celda. (V)	1.8-2.4	1,8-2,2	0,95-1,3
La densidad de potencia. (W/cm <sup>2</sup> )	Hasta 1,0	Hasta 4.4	-
La eficiencia de voltaje. (%)	62-82	67-82	81-86
Consumo esp. de energía. (kWh/Nm <sup>3</sup> )	4.5-7.0	4.5-7.5	2.5-3.5
Zona de carga parcial. (%)	20-40	0-10	-
Área de la celda. (m <sup>2</sup> )	<4	<300	-
Producción de hidrógeno. (Nm <sup>3</sup> /hr)	<760	<30	-
Tiempo de la vida de celda. (hr)	<90000	<20000	<40000
Vida útil del sistema. (Años)	20-30	oct-20	-
Pureza de hidrógeno. (%)	> 99,8	99.999	-
El arranque en frío tiempo. (min)	15	<15	> 60

### 2.3. FUNDAMENTOS DE ELECTRÓLISIS

Técnicamente el funcionamiento de electrólisis alcalina se asemeja por mucho a la analogía de circuitos eléctricos, por tratarse de la electricidad como el medio que la produce. Consecuentemente se trata de analizar una serie de resistencias o elementos impuestos por el sistema, lo que precisa algunos factores claves en el rendimiento de este sistema. En la figura 2.6 puede apreciarse los sobrepotenciales o barreras inmersas en el desarrollo de la electrólisis. Además, se trata más a fondo sobre los principios que rigen las reacciones electroquímicas por su naturaleza física, esto mediante las ecuaciones de termodinámica y de cinética.

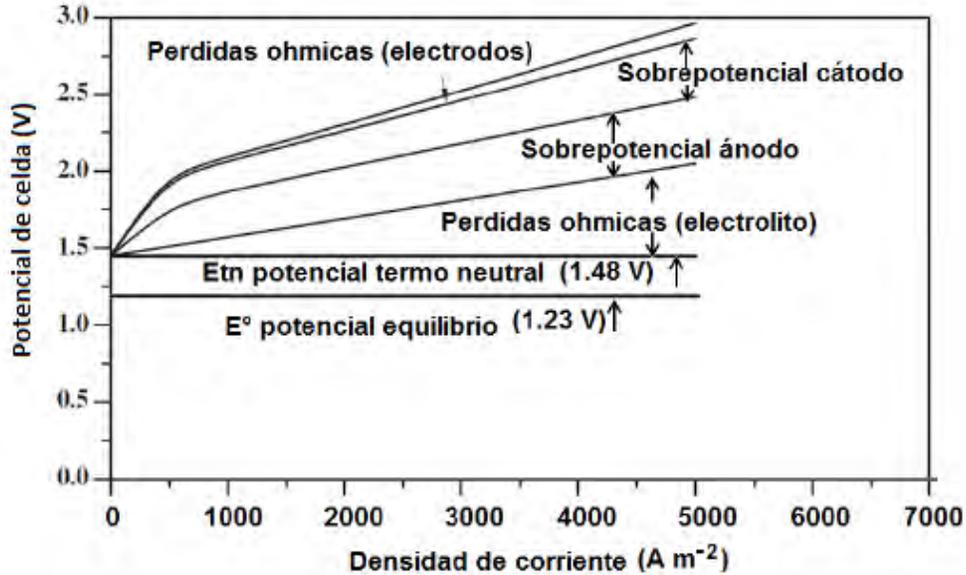


Figura 2.6 Ilustración gráfica del potencial de celda respecto a la densidad de corriente y sobrepotenciales inmersos.

### 2.3.1. ANALOGÍA ELECTRICA DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS

Una manera de analizar el comportamiento de un electrolizador es refiriéndose a una perspectiva diferente a la usual. Para este caso se emplea el uso del circuito eléctrico simple como una alternativa, donde los componentes de primer orden son de carácter lineal (resistencias eléctricas). Con esto se puede referir a que los procesos involucrados en el desarrollo y la producción de los gases sean tomados en forma de resistencia, teniendo de esta forma un comportamiento descriptiblemente fácil.

Para que este tipo de reacción electroquímica se pueda llevar a cabo, se tienen que vencer ciertos obstáculos mediante el aporte de energía eléctrica. Tales obstáculos son: la resistencia eléctrica del circuito, energías de activación propias de las reacciones electroquímicas que ocurren sobre la superficie de los electrodos, la resistencia por la disponibilidad de superficie a causa de la cobertura parcial de las burbujas formadas por los gases y la resistencia de transferencia iónica de la solución electrolítica. Seccionando del exterior hacia el interior de la celda se pueden ubicar estas resistencias, mediante la siguiente ecuación:

$$R_{total} = R_1 + R_{ánodo} + R_{b,O_2} + R_{electolito} + R_{mem} + R_{b,H_2} + R_{catodo} + R'_1 \quad (4)$$

Donde  $R_1$  y  $R'_1$  es la resistencia eléctrica debida a la interconexión del circuito externo con los electrodos, incluye cableado y la interconexión.  $R_{ánodo}$  y  $R_{cátodo}$  es originada por el sobre potencial de la reacción de evolución de oxígeno e hidrógeno.  $R_{b,O_2}$  y  $R_{b,H_2}$  es la resistencia debida a las burbujas generadas por el oxígeno e hidrógeno producido sobre la superficie del electrodo y que tardan en desprenderse, impidiendo el contacto entre el electrodo y el electrolito. Y finalmente  $R_{electolito}$  y

$R_{mem}$  son las resistencias generadas por el paso de los iones a través de la membrana separadora (en este caso se elimina por generar la mezcla de gases) y por el transporte iónico en el electrolito.

Englobando estas resistencias se pueden clasificar en 3 tipos: resistencias eléctricas físicas ( $R_{elec}$ ) definidas por  $R_1$  y  $R'_1$ , resistencias de transporte iónico ( $R_{transporte}$ ) por  $R_{b,O_2}$ ,  $R_{b,H_2}$ ,  $R_{electrolito}$  y  $R_{mem}$ , y resistencias en la reacción electroquímica ( $R_{activación}$ ) por  $R_{ánodo}$  y  $R_{cátodo}$ . De manera se puede resumir con la siguiente ecuación:

$$R_{total} = R_{elec} + R_{activación} + R_{transporte} \quad (5)$$

Con estas tres categorías de resistencias se definen algunos de los factores involucrados en el proceso de electrolisis, que de manera intrínsecamente están presentes y deben consultarse/evaluarse para lograr una mejora en el sistema.

**Resistencias eléctricas físicas:** Comúnmente cualquier materia o sustancia posee una propiedad física fundamental llamada conductividad eléctrica, la cual determina la capacidad que tiene dicho elemento para dejar fluir la corriente a través de él. Un parámetro clave relacionado con la anterior propiedad es la resistencia; la cual es la oposición al paso de la corriente a través de este material, y se define por ser el inverso de la conductancia. Estos factores se presentan en los electrodos y en los cables para la conexión entre la fuente de poder y la celda electrolítica. Para poder evaluar las resistencias que se presentan se enuncian las siguientes ecuaciones:

$$R = \frac{U}{I} \quad (6)$$

$$R = \sum \frac{l}{Ak_g} \quad (7)$$

Donde  $U$  es el potencial/voltaje aplicado, se mide en  $V = volts$ ;  $I$  es la corriente que circula a través del circuito, se mide en  $A = ampers$ . Para la segunda  $l$ ,  $k$ ,  $A$  y  $g$  son la longitud ( $m = metros$ ), conductividad específica ( $S = simens$ ), el área de la sección transversal del conductor ( $m^2 = metro cuadrado$ ) y  $g$  puedes representar el cable o conector y el electrodo, respectivamente.

Al considerar cuan buenos o malos sean los conductores eléctricos y las resistencias que presentan se recomienda tener los mejores para este caso, evitando el calentamiento en estos por efecto Joule y conduciendo a la reducción de la cantidad de energía suministrada y eficiencia.

**Resistencias de transporte iónico:** Particularmente estas son resistencias físicas que solo se experimentan en el proceso de electrolisis donde las burbujas cubren la superficie del electrodo durante el proceso de separación/evolución del gas de hidrógeno como para el oxígeno, surge entre la interface electrodo/electrolito, además de la resistencia de transferencia iónica debido a la membrana usada para la separación de los gases (si se presenta), causando generación de calor de

acuerdo a la ley de Joule y fenómenos de transporte, por lo consiguiente una ineficiencia en el sistema.

La transferencia iónica con el electrolito depende de la concentración del electrolito y la distancia de separación entre los electrodos, así como la membrana entre estos. Por diferir de la conductancia en un conductor metálico al tratarse de un líquido, se adopta la conductividad molar para remplazar este parámetro y se expresa por la siguiente ecuación

$$\Lambda = \frac{k}{c} \quad (8)$$

Donde  $C$  es la concentración del electrolito, se mide en  $m^2/\Omega * mol$  y  $k$  la conductividad específica de la sustancia.

Una de las ecuaciones teóricas aceptadas para el estudio del efecto de burbuja en el electrolito es la siguiente:

$$k_g = k(1 - 1.5 f) \quad (9)$$

Donde  $k$  es la conductividad específica del gas libre-solución electrolito, y  $f$  es la fracción de volumen en la solución. Además de estas ecuaciones para el estudio de las reacciones electrolíticas y físicas de la celda, se describe en el siguiente apartado la naturaleza de las reacciones a partir de las leyes de la termodinámica.

### 2.3.2. TERMODINÁMICA DE CELDAS ELECTROQUÍMICAS

Básicamente para convertir o transformar un tipo de energía a otra se requiere cierta cantidad de energía. En el caso de la energía requerida para la disociación de una molécula de agua para formar hidrógeno y oxígeno, recurrimos a la entalpia de formación de una molécula de agua. Que, por segunda ley de la termodinámica, una parte de la entalpia de reacción ( $\Delta H_R$ ), puede ser aplicada como energía térmica con un máximo igual al producto de la temperatura termodinámica ( $T$  en  $^{\circ}K$ ) y la entropía de reacción ( $\Delta S_R$ ). La diferencia entre la entropía térmica ( $T\Delta S_R$ ) y la entalpia de reacción ( $\Delta H_R$ ) es definida como la energía libre de reacción de Gibbs ( $\Delta G_R$ ) que puede ser referida como la mínima cantidad de la entalpia de reacción que tiene que ser aplicada como energía eléctrica.

$$\Delta G_R = \Delta H_R - T\Delta S_R \quad (10)$$

Esta relación surge a partir de la primera ley de la termodinámica, la cual establece que

$$\Delta U = Q + W \quad (11)$$

Donde  $\Delta U$  es el cambio en la energía interna del sistema,  $Q$  es el calor absorbido por el sistema y  $W$  es el trabajo realizado por el sistema. Generalmente este principio es usualmente aplicado donde se efectúa un trabajo mecánico, como la compresión de un gas bajo la influencia de la presión ( $dW = -PdV$ ). Con esto nos relacionaremos especialmente en el trabajo eléctrico, el cual es definido como el

trabajo realizado cuando una carga eléctrica es movida a través de un diferencial de potencial.

Si consideramos un sistema que es sometido en condiciones de un proceso reversible a temperatura y presión constantes ( $P - V$ ) en los que se realiza tanto el trabajo mecánico como el trabajo eléctrico  $W = -P\Delta V + W_{elec}$ . Para un proceso reversible a temperatura constante  $Q = T\Delta S$ , sustituyendo en la ecuación 11 esta se convierte en

$$\Delta U_{T,P} = T\Delta S - P\Delta V + W_{elec} \quad (11.1)$$

A presión constante, el cambio en la entalpía del sistema es

$$\Delta H_P = \Delta U_P + P\Delta V \quad (11.2)$$

Y a temperatura constante, el cambio en la energía libre de Gibbs es

$$\Delta G_T = \Delta H_T - T\Delta S \quad (10.1)$$

Lo que nos devuelve a la ecuación 10. Y combinando las ecuaciones (11.1 – 10.1), tenemos

$$\Delta G_{T,P} = W_{elec} \quad (12)$$

Si consideramos una celda electroquímica (sistema termodinámico) la cual tiene dos terminales, donde hay un diferencial de potencial eléctrico  $E$ ; conectadas a una carga externa (entorno) por medio de cables. Cuando la carga  $Q$  es movida mediante un diferencial de potencial  $E$ , el trabajo hecho por el entorno es  $EQ$ . La carga que pasa en el circuito es el producto del número de portadores de carga y la carga por portador de carga. Asumiendo que los portadores de carga son electrones, entonces tenemos

$$Q = (\text{numero de electrones}) * (\text{carga/electrón}) = Ne$$

Que también puede escribirse

$$Q = (\text{numero de mol de electrones}) * (\text{carga/mol}) = nF$$

Donde  $F$  es la constante de Faraday, que expresa la carga sobre moles de electrones  $96,485 C$  en coulombs, y  $n$  es el número de moles de electrones transferidos. Por lo tanto, el trabajo hecho por el sistema sobre la carga externa es simplemente  $nFE$ . De acuerdo con la convención de signos de la ecuación 11, el trabajo hecho por el sistema es positivo; así que el trabajo eléctrico es negativo si el sistema transfiere energía hacia el entorno.

$$W_{elec} = -nFE \quad (12.1)$$

Sustituyendo la ecuación 12.1 en 11.1, se obtiene el cambio el cambio en la energía libre de Gibbs en para temperatura y presión constante.

$$\Delta G_{T,P} = -nFE \quad (12.2)$$

Donde  $E$  en *Volts*,  $F$  en *C/mol*, y  $n$  es el numero de moles de electrones por mol de reacción (adimensional), por lo tanto  $\Delta G$  tiene unidades de joule por mol (*J/mol*) ya

que  $1 J = 1 V * C$ . De este modo se obtiene el método directo para el cambio en la energía libre de Gibbs sin recurrir a la constante de equilibrio de entalpia y entropía como se hizo en la ecuación 10. A partir de esta relación podemos obtener el potencial requerido para la descomposición de agua, despejando  $E$ , que también se denomina voltaje de celda reversible

$$E^{\circ} = \frac{\Delta G^{\circ}}{nF} \quad (13)$$

Para este caso el trabajo hecho por el sistema es positivo lo que nos cambia de signo de la ecuación 12.2. Donde  $E^{\circ}$  es el potencial reversible termodinámico en *Volts*. Que en condiciones estándar, es decir,  $1 \text{ Atm}$  ( $101.325 \text{ kPa}$ ), y a  $298.15 \text{ K}$  ( $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), la energía libre de Gibbs de formación es  $\Delta G^{\circ} = 237.2 \text{ kJ/mol}$ ,  $n = 2$ , el número de electrones transferidos y  $F = 96,485 \text{ C/mol}$  la constante de Faraday. El potencial reversible de celda  $E^{\circ} = 1.229 \text{ Volts}$ .

El valor del potencial reversible termodinámico puede ser obtenido también mediante la suma de los potenciales de la semi reacción de reducción en el cátodo y la semi reacción de oxidación en el ánodo, dándonos la siguiente ecuación.

$$E_{rev} = E_{red,cátodo} - E_{oxi,ánodo} \quad (14)$$

Cuando en una celda existe una energía exactamente igual a la entalpia de disociación del agua ( $\Delta H^{\circ} = 285.8 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) el sistema no absorbe ni emite calor. El potencial que corresponde con estas condiciones adiabáticas se denomina potencial termoneutral y puede determinarse con una simple variación en la ecuación 13 sustituyendo la energía de formación por la entalpia de disociación del agua.

$$E^{\circ}_{tn} = \frac{\Delta H^{\circ}}{nF} = 1.482 \text{ V} \quad (13.1)$$

Si el potencial aplicado a una celda es menor que el termoneutral, entonces la reacción de electrólisis es endotérmica y se produce adecuadamente. Sin embargo, si el potencial de celda es mayor que el termoneutral la reacción que se produce es exotérmica y existe un exceso de calor que se pierde (refiérase a la figura 2.7). Por lo tanto, el potencial termoneutral es un límite termodinámico superior que no debe superarse.

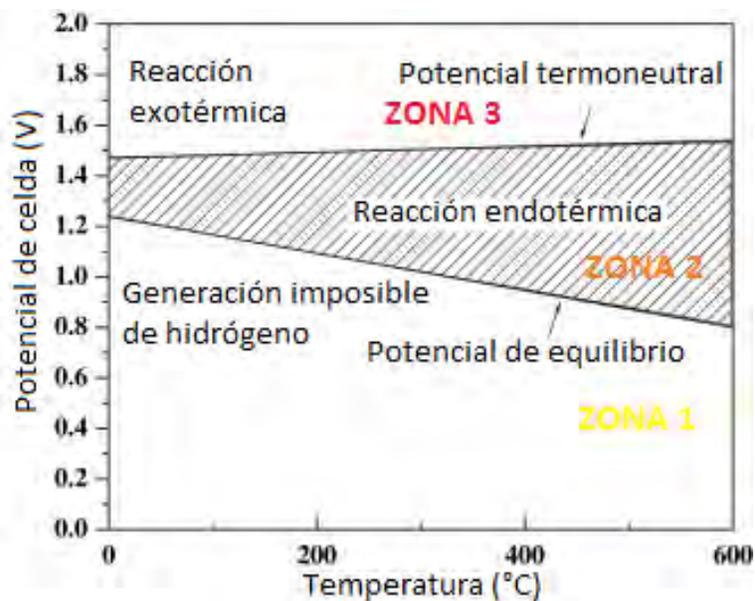


Figura 2.7 Ilustración gráfica del potencial de celda para la efectuación de electrólisis del agua en función de la temperatura.

### 2.3.3. ASPECTOS CINÉTICOS

La cinética de las reacciones electroquímicas que tienen lugar en el proceso electrolítico se puede expresar en términos de sobre potencial. Esta viene determinada por la estructura y composición de la interface electrólito-electrodo. El comportamiento de un electrolizador está influenciado por la cinética de los electrodos, por la estructura física y geometría de la celda y por el tipo de electrolito utilizado. Estos factores se manifiestan como pérdidas de eficiencia, aumento del voltaje requerido respecto el teórico, y dan lugar a pérdidas por polarización, sobre potencial o sobre voltaje. Una manera de describir estos sobre potenciales o pérdidas es mediante las ecuaciones correspondientes a su naturaleza.

La doble capa es uno de los retos que afectan el rendimiento de la evolución de los gases y provocan un sobre potencial en la celda debido a la superficie del electrodo, en la figura 2.8 puede observarse la acumulación de las burbujas que se desarrollan entre el electrodo y el seno del electrolito.

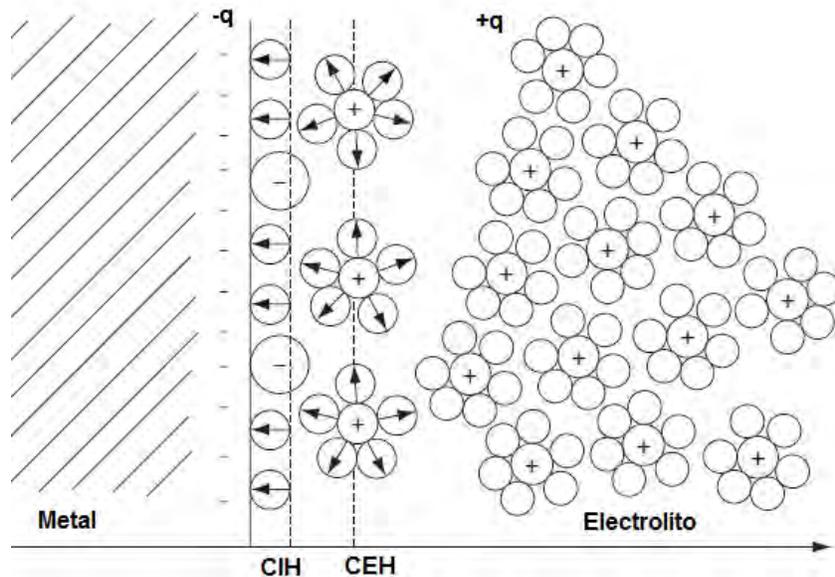


Figura 2.8 Ilustración esquemática de la doble capa electroquímica y la distribución del potencial en las fronteras del electrodo.

La capa más próxima a la superficie del electrodo está relativamente ordenada y se denomina “capa interna de Helmholtz CIH”. La otra menos ordenada se denomina “capa externa de Helmholtz CEH”. La formación de esta doble capa crea un diferencial de potencial, es decir, un sobrepotencial que debe vencerse. Para esto los iones solvatados se acercan al electrolito solamente hasta la CEH, para que logren penetrar en la CIH es necesario el aporte de energía para el desprendimiento del ion solvatado hacia la interacción con el metal. La doble capa es un proceso no farádico que se rige por el carácter capacitivo de las reacciones electrolíticas.

Partiendo de la ley de Faraday para la electrólisis, el número de especies electrolizadas viene dado por la ecuación

$$N = \frac{Q_t}{nF} \quad (15)$$

Donde  $Q_t$  es la carga total en Coulomb transferida durante la reacción, entonces la velocidad de la electrólisis puede escribirse como

$$R \left( \frac{\text{mol}}{s} \right) = \frac{dN}{dt} = \frac{d\left(\frac{Q_t}{nF}\right)}{dt} = \frac{1}{nF} \frac{dQ_t}{dt} = \frac{I}{nF} \quad (16)$$

Donde  $I$  es la intensidad de corriente, lo cual es necesario tener en cuenta el área superficial del electrodo o metal ( $A_e$ ). Por lo tanto, la velocidad de electrólisis puede escribirse como sigue

$$r \left( \frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 s} \right) = \frac{I}{nFA_e} = \frac{j}{nF} \quad (17)$$

Donde  $j$  es la densidad de corriente. En términos de la teoría clásica de las velocidades de reacción, la velocidad de una reacción catódica (densidad de corriente de reducción) está dada por

$$\rightarrow_j = const * k_{rev} * e^{-\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right)} \quad (18)$$

Donde  $k_{rev}$  es la reacción constante en equilibrio y  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia. Por el contrario, la velocidad de la reacción anódica es

$$\leftarrow_j = const * k_{rev} * e^{\left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT}\right)} \quad (19)$$

Por lo tanto, la densidad de corriente está dada por

$$j = j_0 \left[ e^{\left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT}\right)} - e^{-\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right)} \right] \quad (20)$$

La ecuación 20 es la clásica Butler-Volmer ecuación. La ecuación fundamental de la cinética electroquímica que describe como las barreras de la reacción afectan a la relación entre la densidad de corriente  $j$  con respecto al potencial de trabajo de electrodo.

## 2.4. CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Para tener un rendimiento óptimo del funcionamiento de un electrolizador es necesario determinar las condiciones en las que este puede operar. Los factores que influyen en la calidad y cantidad de hidrógeno producido son principalmente el potencial de operación y la densidad de corriente, en donde intrínsecamente la temperatura del electrolito y el tipo de material del electrodo son determinantes en el desenvolvimiento de estos. A continuación, se mencionan algunos parámetros a tomar en cuenta.

**Potencial de operación, densidad de corriente y eficiencia:** Un parámetro a tener siempre en cuenta es la eficiencia, ya que este determina si un dispositivo es energéticamente recomendable. Los electrolizadores comerciales aprovechan aproximadamente el 65% de energía, sin embargo, este valor puede variar debido a la temperatura y a la presión de trabajo que alcanzan durante el desempeño, teniendo un top de hasta un 85%. A condiciones ideales de operación, se ha calculado que la cantidad de consumo de energía específica para producir hidrógeno ronda entre 4.1 y 4.5  $kWh/Nm^3 H_2$  [4, 10].

Una forma muy sencilla de calcular la eficiencia para el proceso de electrólisis del agua puede ser al evaluarse el cociente entre el contenido energético del hidrógeno y la energía eléctrica suministrada, que en términos de potencial nos queda:

$$\eta = \frac{E_{tn}}{E_{celda}} \quad (21)$$

Cuando una celda electrolítica opera a un potencial igual al termoneutral, es decir,  $E_{celda} = E_{tn}$ , el calor generado en el interior de la celda aporta la energía restante para conducir a la reacción de la electrólisis, este proceso se denomina operación

autotérmica [4]. Las celdas deben operar a potenciales bajos y altas densidades de corriente para lograr altas eficiencias altas velocidades de producción de hidrógeno. Recordemos que, para la electrólisis del agua, en una celda ideal y a condiciones estándar, es necesario aplicar un voltaje de descomposición de 1.23 V, también llamado potencial reversible termodinámico o de equilibrio; sin embargo, para que la reacción resulte más efectiva, es necesario un aporte de energía en forma de calor o un aumento del potencial a 1.48 V denominado potencial termoneutral.

El calor juega un papel importante en los electrolizadores, regresando a la figura 2.7 donde se ilustra el potencial de celda en función de temperatura y se aprecian tres zonas. En la zona 1 la electrólisis no puede efectuarse por debajo del potencial reversible. En la zona 2 el sistema absorbe calor mediante un proceso endotérmico y la producción de hidrógeno es llevada a cabo pobremente. En la zona 3 la electrólisis desprende calor excedente y disminuye la eficiencia del proceso, se le llama exotérmica. Por lo que este proceso debe ser llevado a cabo de manera eficiente sobre la frontera de la zona 3 y 2.

El potencial típico por celda oscila entre los 1.65 a 2.05 V [10] y depende tanto de la temperatura de trabajo como de la densidad de corriente. En la figura 2.9 puede observarse la variación de las curvas características de un electrolizador alcalino a diferentes temperaturas.

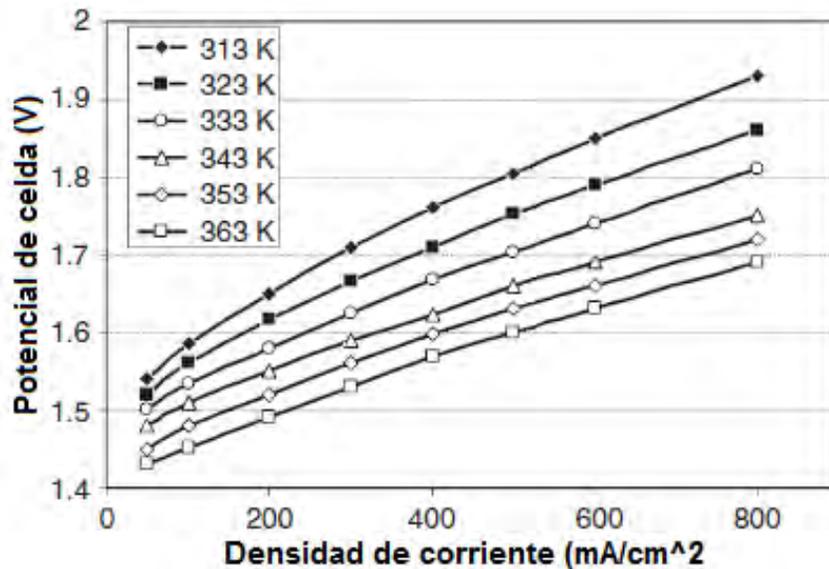


Figura 2.9 Ilustración grafica de curvas características de una celda electrolítica alcalina a diferentes temperaturas.

## 2.5. CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA

El termino caracterización se refiere a la determinación del desempeño de un dispositivo máquina o sistema que, envuelto en un área de trabajo bajo ciertos parámetros como presión atmosférica, temperatura del medio, fluido de trabajo o tipo/cantidad de combustible, entre otros (típicamente empleados) pueden interferir

en los resultados o atributos que este puede emitir. Debido a esto es indispensable determinar y proporcionar los medios empleados durante el ciclo de trabajo para la validación de los resultados.

### **2.5.1. CURVAS DE POLARIZACIÓN ESTÁTICA**

La curva de polarización lineal puede obtenerse por medio de un dispositivo llamado potencióstato, el cual es empleado específicamente para la evaluación de la resistencia a la polarización y medición de la velocidad de corrosión. Una interpretación sencilla es recordar la conocida ley de Ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre dos puntos resulta en un flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia.

La técnica electroquímica consiste en la aplicación de escalones equipotenciales donde se espera alcance un estado estacionario antes de registrar una respuesta de corriente. También se puede realizar la curva de manera potencio dinámica. Para realizar un estudio experimental de resistencia a la polarización es recomendable acudir a la norma ASTM G 59-91, donde menciona los pasos a seguir para evaluar correctamente la curva de polarización.

### **REFERENCIAS**

- [1] T Smonika; water electrolysis; Fraunhofer institute for solar energy systems ISE; (2009), Freiburg, Germany.
- [2] Enrique Castaños; Electrolisis. Lidia con la química, (2015). Última visita mayo 2017, disponible: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/tag/electrolisis/>
- [3] Mónica gonzales, Electrolito, la guía 2000, (2010). Última visita mayo 2017, disponible: <http://quimica.laguia2000.com/elementos-quimicos/electrolito>
- [4] Isaac Herraiz Cardona; Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrógeno a partir de la electrolisis alcalina del agua. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España (2012).
- [5] Michael Frank Horddeski; Alternative fuels-the future of hydrogen; The fairmont press, 3th ed. (2013), USA.
- [6] Luis M. Gandía Gurutze Arzamendi, Pedro M. Diéguez; Renewable hydrogen technologies production, purification, storage, applications, and safety. Ed. Elsevier, Poland (2013). Pag. 19-41.
- [7] Greig Chisholm, Leroy Cronin; Hydrogen from water electrolysis; School of Chemistry, University of Glasgow; (2016) Glasgow, United Kingdom.
- [8] Kai Zeng, Dongke Zhang; Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. Progress in Energy and Combustion Science. 2010 36: 307-326.
- [9] J rgen Garche, Chris K Dyer; Encyclopedia of electrochemical power sources. Ed. Elsevier B.V (2009). Pag. 394-413.

[10] Guillermo A. Sánchez Gullén; Evaluación de electrodos porosos de vítreo reticulado para la producción de gas  $H_2$  mediante electrólisis del agua. Tesis de grado. Instituto Politecnico Nacional. 2014.

## CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1. ELECTROLIZADOR “ $\beta$ ”

Para el diseño, construcción y caracterización de un electrolizador alcalino que cumple la función de generar hidrógeno y oxígeno mezclados, por no poseer una membrana o diafragma que permita la captación de los gases durante su evolución de forma separada; estos gases mezclados se denominan gas oxí-hidrógeno. Se contemplan los parámetros de diseño y caracterización a partir de un primer electrolizador alcalino ya construido, nombrado “ $\beta$ ”, el cual fue facilitado por el Instituto Politécnico Nacional, unidad profesional interdisciplinaria en ingeniería y tecnologías avanzadas. Las pruebas realizadas describen el comportamiento del escalamiento de celda por celda hasta un total de siete celdas (celdas totales del EA), esto con la finalidad de obtener una estrategia que describa el comportamiento relacionado con el flujo volumétrico de gas oxí-hidrógeno producido por el electrolizador y el dimensionamiento para su aplicación en motores térmicos.

#### Equipo y materiales utilizados

- Multímetro
- Llaves de 11 mm
- Caimanes
- Electrolito NaOH al 5%
- Lija del número 1000
- Fuente de poder CD, marca XLN 100-14
- Celda electrolítica (electrolizador alcalino, placas metálicas-acero inoxidable tipo 304).
- Burbujeador para electrolizador

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL ELECTROLIZADOR “ $\beta$ ”

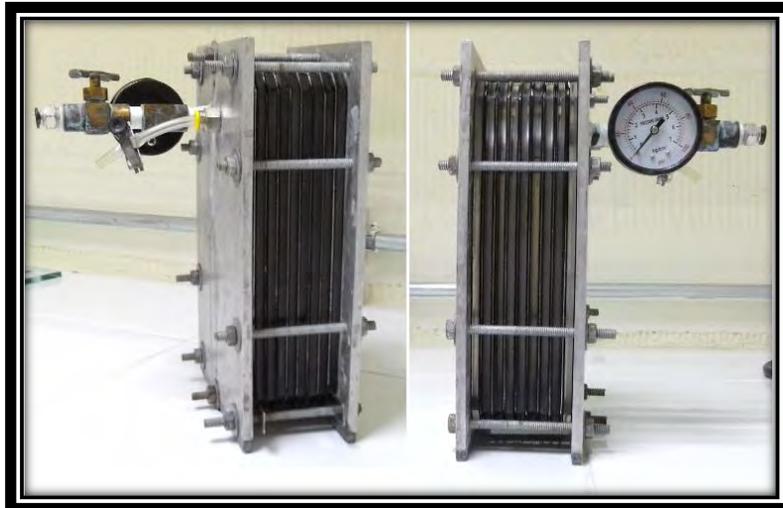
El electrolizador está compuesto por siete celdas electrolíticas, como son: sellos de neopreno, placas de acero inoxidable como placas bipolares y placas de acrílico como espaciadores entre las placas bipolares.

*Tabla 3.1 Parámetros del electrolizador  $\beta$ .*

Parámetros del Electrolizador $\beta$		
Largo int.	15	cm
Ancho int.	8	cm
Área efectiva	120	cm <sup>2</sup>
Espacio entre celdas	0.5	cm
Largo ext.	17	cm

Ancho ext.	11	cm
Número de celdas	7	
Voltaje teórico	1.48	V
Voltaje de operación	2.3	V

En la figura 3.1 se ilustra el EA comprendido por el total de sus celdas y en la posterior figura 3.2 se muestran los principales componentes que lo integran.



*Figura 3.1 Electrolizador  $\beta$ .*



*Figura 3.2 Partes que complementan el electrolizador  $\beta$ .*

Previo a la caracterización del EA, es indispensable efectuar primero el mantenimiento del dispositivo. Por este motivo, se procedió a desmantelar el

electrolizador por completo para limpiar las caras de placas bipolares, los sellos de neopreno y los espaciadores de acrílico. Debido a que después de efectuarse las reacciones de generación de los gases en la superficie de los electrodos en contacto con el electrolito, ocurre la formación de una película de tono amarillento en las caras de las placas bipolares con polaridad negativa, es decir, en el lado del cátodo, donde se desprende el hidrógeno molecular en forma de burbujas. En la figura 3.3 se observa la presencia de la película de tono amarillento en las placas bipolares de acero inoxidable.



*Figura 3.3 Formación de la película de tono amarillento en las placas bipolares.*

Este es el principal obstáculo en la caracterización del EA, ya que previo a la obtención de la curva característica del sistema se debe partir por eliminar cualquier rastro de impureza en la pared de los electrodos, por la razón de que, si esto no se llevara a cabo, se observarían variaciones durante la caracterización.

Para la eliminación de la película de tono amarillento en las placas bipolares, se realizó un proceso de pulimiento con lijas del número #1000; es decir, lijar la superficie con una lija fina para no rayar o dejar imperfecciones en la superficie de las placas bipolares, procedimiento realizado para cada una de las placas que presente esta película. Esta medida evitará en futuras mediciones la presencia de efectos secundarios en los gases producidos o en el desempeño del sistema. En la figura 3.4 se muestran las placas, los sellos y los separadores de acrílico limpios y listos para iniciar con el escalamiento de celda por celda.



*Figura 3.4 Total de piezas del electrolizador de referencia  $\beta$ .*

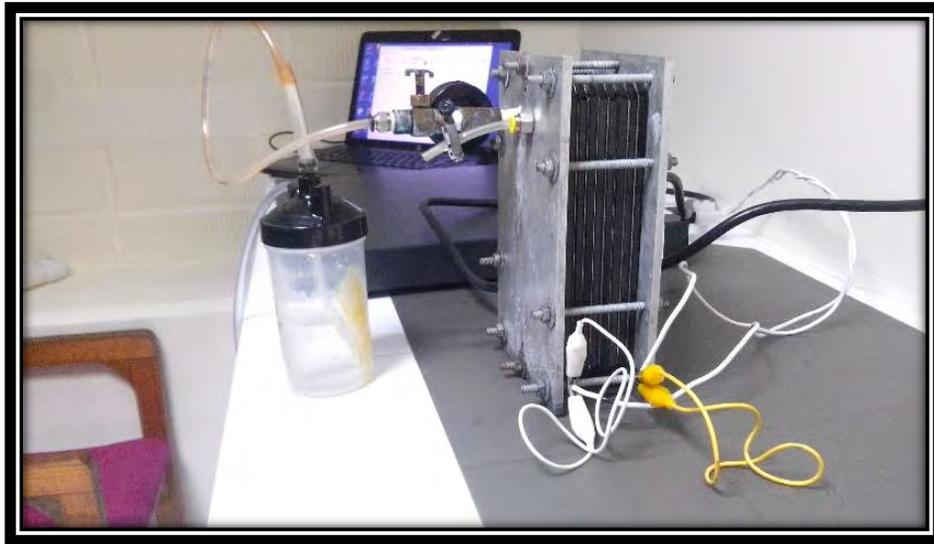
Después del lavado y eliminación de la película en las placas bipolares del EA se procedió a realizar el primer ensamble por celda (monocelda). Esta primera prueba define la obtención de la curva característica del sistema, donde se plantea la utilización de una monocelda, es decir, la forma más básica de una celda electrolítica: una placa de acero como ánodo, otra como cátodo y entre ellas la disolución: electrolito NaOH al 5% en peso, con un distanciamiento de 0.5 cm entre las placas.

Para la realización de las pruebas de la caracterización del electrolizador se realizó el siguiente protocolo para la conexión y puesta en marcha de la prueba.

- Teniendo el ensamble listo, se procede a llenarlo hasta un 80% de su capacidad con el electrolito, NaOH al 5%
- Se inician los equipos para el registro de datos (equipo de medición y computadora)
- El equipo de medición es una fuente de poder modelo XLN 100-14, enlazado a una computadora a través de un cable USB 2.0
- La interfaz de operación del equipo de medición se debe encontrar instalada en la computadora a utilizarse, teniendo instalado el software se pone en marcha y se conecta a través del puerto que disponga el equipo.
- Se realiza la conexión eléctrica entre el equipo de medición y los electrodos del EA, conectando el polo positivo hacia la parte posterior y polo negativo hacia la parte frontal del electrolizador
- Se realiza la configuración de los parámetros de la prueba se establece un barrido de voltaje de 0.1 V por un periodo de 5 minutos, considerando como voltaje mínimo 1.0 V y máximo 2.3 V respectivamente para cada celda. Además, es necesario fijar el valor de la corriente máxima como medida de seguridad y protección para el equipo de medición, esta es < 5 A.
- Se inicia la prueba y se observa el comportamiento de los cambios de tensión y corriente a través de las gráficas mostradas en el software durante la prueba.

- Los resultados del test son obtenidos en forma de lista, donde se registra el voltaje suministrado en función del tiempo y la corriente de operación también en función del tiempo. Estos datos son colectados en una tabla de Excel.

Este protocolo fue realizado cada vez que se realizaba un test de medición, siempre asegurándose primero la limpieza de las placas bipolares del EA del test anterior. La figura 3.5 ilustra el banco de mediciones empleado.



*Figura 3.5 Banco de test de mediciones.*

### **3.3. ELECTROLIZADOR “ $\alpha$ ”**

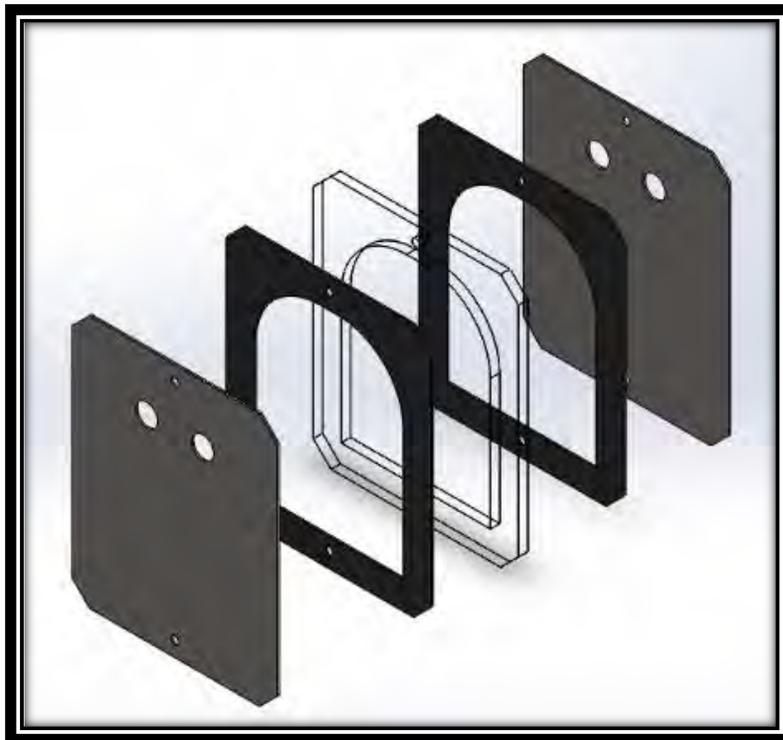
Efectuada la tarea de la caracterización del electrolizador  $\beta$  mencionado en el apartado anterior, se continuo con la manufactura de un nuevo EA contemplando las mismas características del electrolizador  $\beta$ . La diferencia significativa radica en que el que el área activa del nuevo electrolizador sería la mitad del primero. Esto con el objetivo de reducir el consumo en la corriente de operación del EA y realizar una comparación por medio de la respuesta de la caracterización.

#### **Materiales y equipo empleados**

- Placa de acero inoxidable 304
- Hoja de acrílico de espesor de 5mm.
- Neopreno industrial color negro
- Placa de acero inoxidable de espesor de 3mm.
- Esparrago de  $\frac{1}{4}$  de pulgada por 1m.
- Rondanas y tuercas
- Taladro de banco
- Cortadora o rehilete

#### **Construcción**

La manufactura del electrolizador  $\alpha$  se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad de Quintana Roo, en el taller/laboratorio de hidrógeno. Se realizó un diseño preliminar del EA para considerar cualquier aspecto antes de la construcción, además de posibles modificaciones al diseño original. Esto se efectuó con la ayuda del programa de dibujo asistido por computadora SOLIDWORKS, en la siguiente imagen se ilustra el diseño de las placas bipolares, sellos y espaciador de acrílico.



*Figura 3.6 Diseño realizado en SolidWorks del electrolizador  $\alpha$ .*

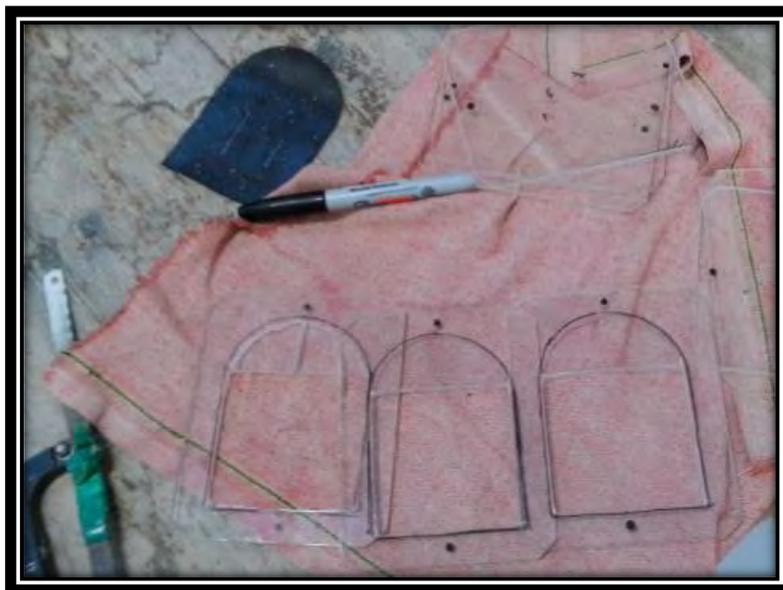
La realización de un diseño es fundamental para la manufactura de prototipos, debido a que nos permite conocer las medidas reales a las que se cortara el material reduciendo los posibles errores de trazo y corte.

La manufactura de las placas bipolares de acero inoxidable fue realizada mediante un servicio externo, esto a causa de la dificultad y precisión en el corte, lo que resultaría en un grave problema si se realizaba manualmente.



*Figura 3.7 Placas bipolares del electrolizador  $\alpha$ .*

Los separadores se realizaron con acrílico transparente de 5 mm. de espesor, con la misma forma del electrolizador  $\beta$ . La manufactura se realizó manualmente con la ayuda del taladro de banco y la cortadora, con el más extremo cuidado de no romperlos o deformarlos.



*Figura 3.8 Separadores de acrílico.*

Posteriormente se cortaron los sellos de neopreno, los cuales tienen la finalidad de sellar las celdas evitando fugas de electrolito. El diseño de estos es similar a los

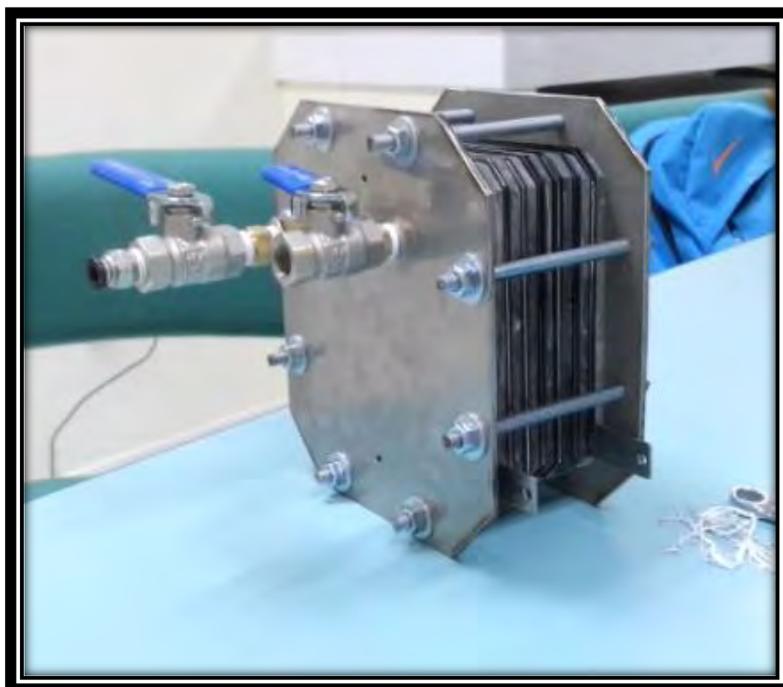
espaciadores, debido a que se colocaran entre los espaciadores y las placas bipolares.

Finalmente, se manufacturaron las placas finales con las que se compactaran las celdas entre sí, mediante ocho espárragos de  $\frac{1}{4}$  de pulgada y tuercas y rondanas para una mejor sujeción y firmeza.



*Figura 3.9 Perforación de placas finales.*

Con la conclusión de la perforación de las placas finales y la instalación de las válvulas para la salida del gas, el último paso fue la construcción del electrolizador con las siete celdas. En la figura 3.10 se ilustra el electrolizador  $\alpha$  terminado.



*Figura 3.10 Ensamblado final del electrolizador  $\alpha$ .*

Finalizada la construcción del electrolizador  $\alpha$ , el siguiente paso fue la caracterización del mismo con los parámetros efectuados en el electrolizador  $\beta$ .

### **3.4. CARACTERIZACIÓN DEL ELECTROLIZADOR “ $\alpha$ ”**

La caracterización del EA  $\alpha$  se basa en la verificación de parámetros efectuados en el EA  $\beta$ , siguiendo el mismo protocolo de conexión para evitar alteraciones en el proceso de caracterización y obtener una réplica de los resultados capturados en el primer electrolizador.

*Tabla 3.2 Parámetros del electrolizador  $\alpha$ .*

Parámetros del Electrolizador $\alpha$		
Largo int.	8	cm
Ancho int.	8	cm
Área efectiva	64	cm <sup>2</sup>
Espacio entre celdas	0.5	cm
Largo ext.	13	cm
Ancho ext.	11	cm
Número de celdas	7	

Voltaje teórico	1.48	V
Voltaje de operación	2.3	V

Se efectuó la limpieza de las placas bipolares antes de cada test de medición donde también se presentaba el mismo efecto de la película amarillenta a un lado de las placas bipolares. En la figura 3.11 se ilustra el fenómeno. Esta película también fue removida con la ayuda de una lija y posteriormente a su remoción, se efectuó el ensamble correspondiente de acuerdo al protocolo, figura 3.12.



Figura 3.11 Oxidación de placa bipolar en el extremo del ánodo.

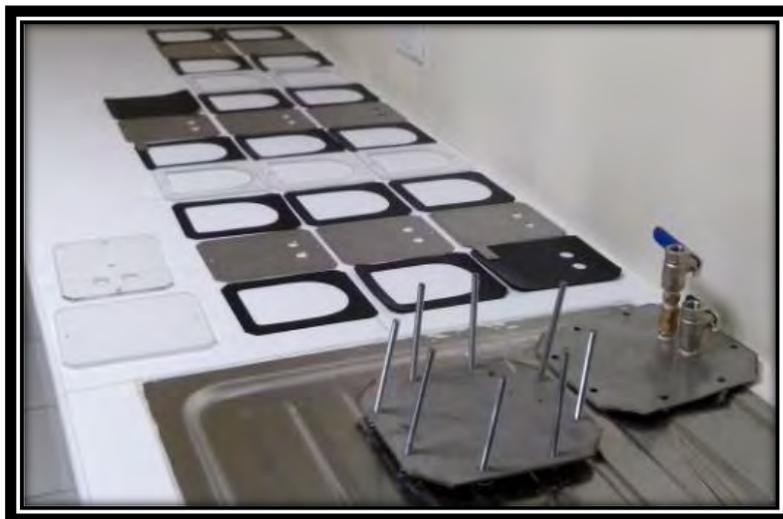
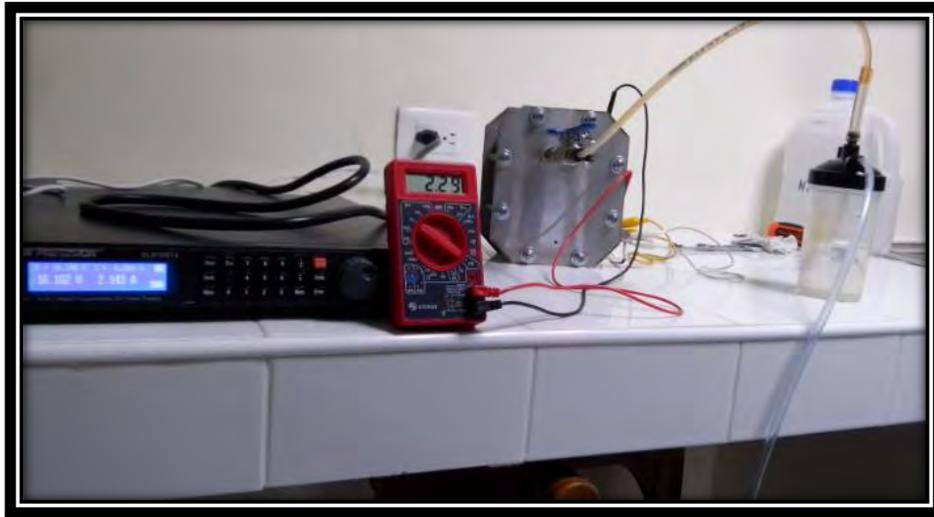


Figura 3.12 Despliegue del EA antes de iniciar el protocolo.

En la figura 3.13 se observa el montaje experimental del electrolizador  $\alpha$  durante la implementación del protocolo. La formación del oxi-hidrógeno durante el proceso de electrólisis y aplicación del protocolo se muestra en la figura 3.14.



*Figura 3.13 Banco de mediciones*



*Figura 3.14 Burbujas de oxi-hidrógeno.*

Finalmente, realizado el protocolo y con los datos capturados se prosigue su evaluación mediante una breve descripción del desempeño y comportamiento de la celda, con la finalidad de obtener una respuesta al escalamiento de las celdas para ambos electrolizadores y el dimensionamiento de estos en función del área efectiva y la cantidad de celdas disponibles.

En el siguiente capítulo se describen los resultados del desempeño de ambos electrolizadores en función del protocolo efectuado y una comparación de ambos sistemas.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. RESULTADOS DE ELECTROLIZADOR “ $\beta$ ”

La serie de pruebas realizadas permitirá determinar mediante la curva potencial-corriente el desempeño de los dispositivos, en función del número de celdas y del área activa. A continuación, se ilustra el comportamiento eléctrico del EA  $\beta$  para algunas de las curvas de caracterización aplicadas en modo monocelda y con diferente número de celdas, en ocasiones hasta completar el conjunto completo (7 celdas).

Para la caracterización se realizaron saltos de potencial con periodos de 5 segundos como prueba rápida y de 5 minutos como prueba prolongada por cada intervalo de potencial incrementado, en un rango entre 1.0 y 2.3 V por celda, como potencial mínimo y máximo seccionados entre 14 intervalos.

#### 4.1.1. PRUEBA RÁPIDA

En la figura 4.1 se muestra la curva de desempeño de la monocelda del EA  $\beta$  durante la prueba rápida; saltos de potencial de 0.1 V cada 5 segundos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V fueron realizados. Puede observarse que no se muestra un consumo de corriente debido al bajo potencial para iniciar la disociación de los iones, a partir de 1.9 V inicia el flujo de electrones y con esto un muy ligero burbujeo en la celda electrolítica. Conforme se aumenta el potencial por arriba de 2.0 V hay un consumo de corriente y se incrementa la producción de gases, la corriente máxima se aproxima a los 2.5 A.

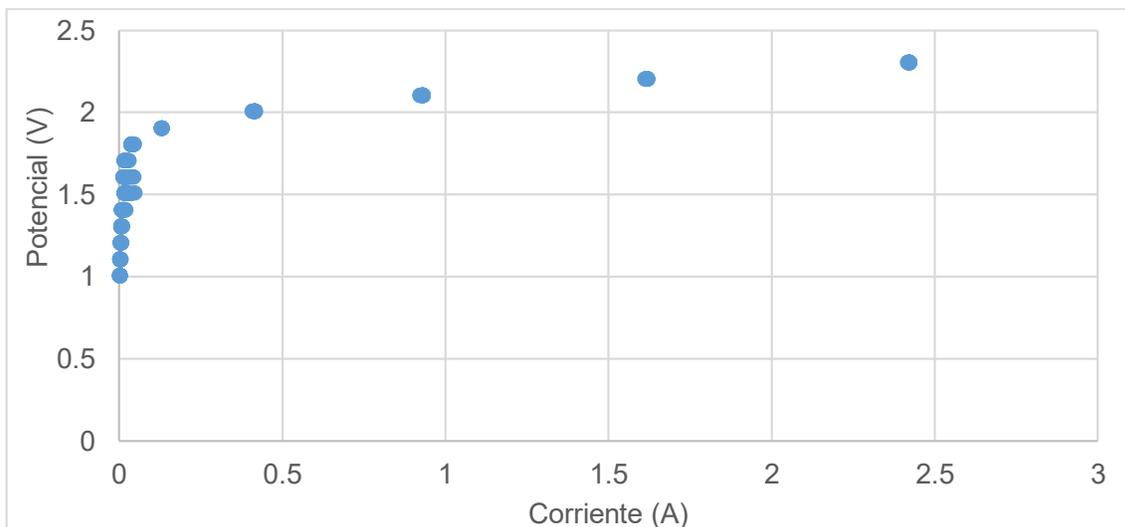


Figura 4.1 Desempeño del EA  $\beta$  de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 segundos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V.

La figura 4.2 corresponde al desempeño con el doble de celdas del EA  $\beta$ . Durante esta prueba el potencial se incrementó el doble por celda, así como el salto de potencial durante los 5 segundos.

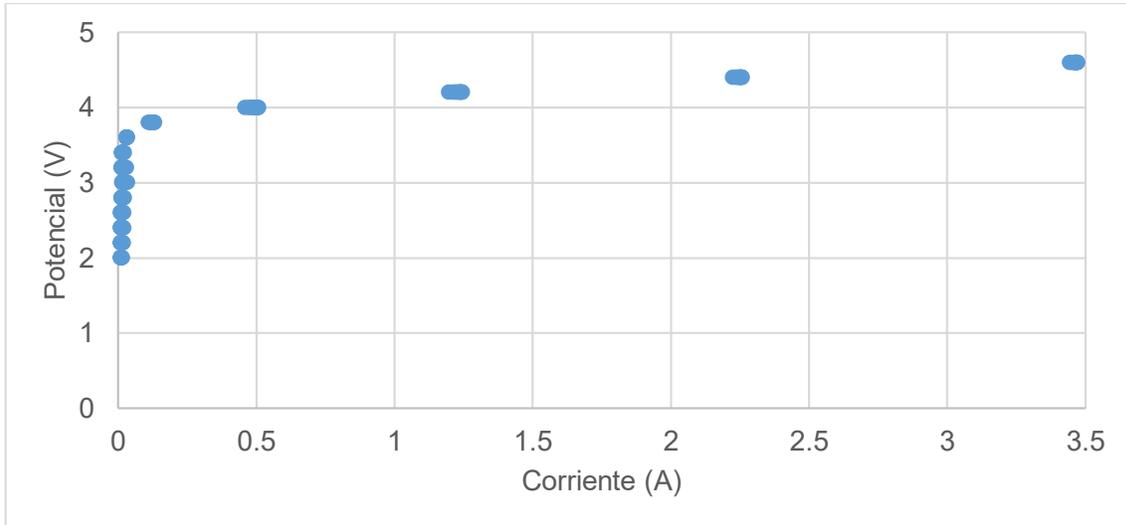


Figura 4.2 Desempeño del EA  $\beta$  de 2 celdas con saltos de potencial de 0.2 V/5 segundos comprendidos en 2.0 y 4.6 V.

Prácticamente el desempeño del EA  $\beta$  es ligeramente similar al anterior, con la diferencia que el consumo corriente es de alrededor de los 3.5 A cuando el potencial es el doble. La figura 4.3 muestra el desempeño del EA  $\beta$  de 5 celdas con saltos de potencial en el orden de 0.5 V cada 5 segundos.

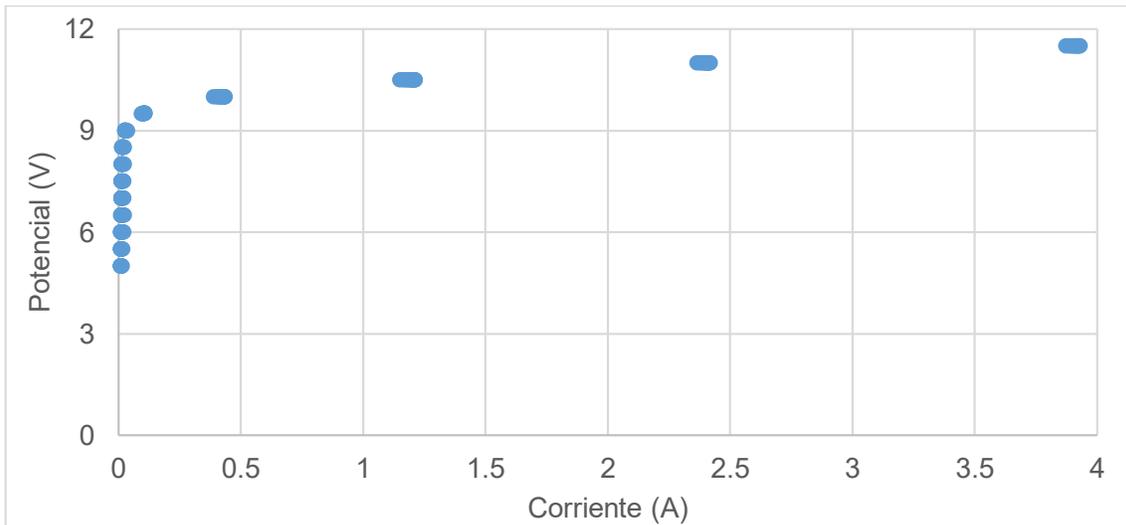


Figura 4.3 Desempeño del EA  $\beta$  de 5 celdas con saltos de potencial de 0.5 V/5 segundos comprendidos en 5.0 y 11.5 V.

Además del incremento gradual de potencial y corriente por cada aumento de celdas al EA  $\beta$ , se puede observar que existe un incremento de corriente en la diferencia entre el consumo final de un salto anterior con el siguiente salto de alrededor de 0.2

A. Esto puede ser debido a la amplitud en el salto de potencial incrementado por el número de celdas añadidas al sistema.

En la figura 4.4 se ilustra el desempeño del EA  $\beta$  con el total de las 7 celdas, se puede apreciar que hay una reducción en el consumo de la corriente a los 16.1 V (2.3 V correspondiente por cada celda) en comparación con el experimento anterior que incluía 5 celdas y con corrientes máximas de 3.9 a 3.2 A (figura 4.3).

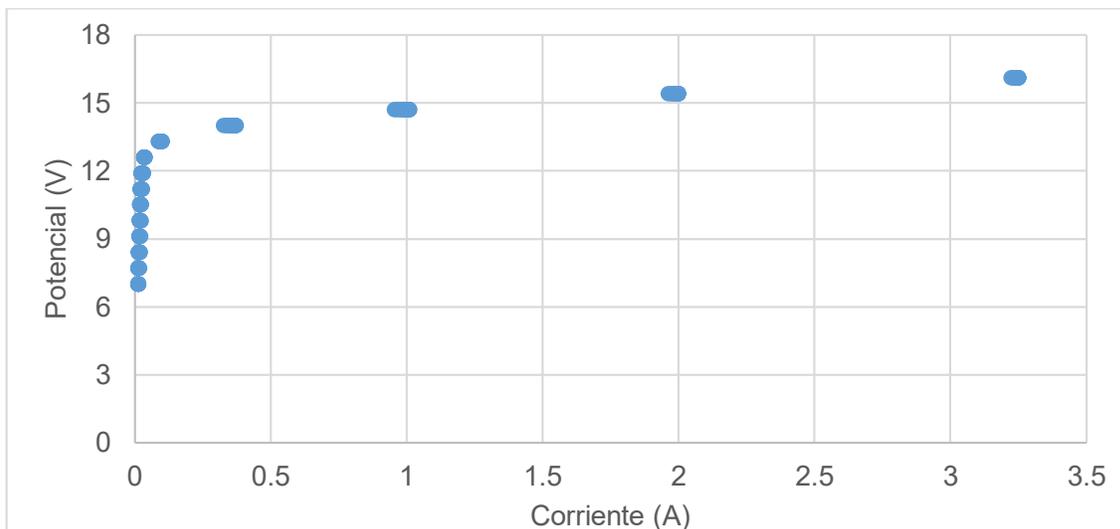


Figura 4.4 Desempeño del EA  $\beta$  de 7 celdas con saltos de potencial de 0.7 V/5 segundos comprendidos en 7.0 y 16.1 V.

Las secuencias en las pruebas realizadas con periodos de 5 segundos muestran el mismo comportamiento en cuanto al incremento del potencial respecto al número de celdas agregadas al EA. La corriente también sigue ligeramente esta tendencia, pero no en el mismo orden. En cuanto a la cantidad de gases producidos no se tienen registro, ya que no son medidos y son liberados al medio ambiente para evitar su concentración y evitar cualquier tipo de incidente.

#### 4.1.2. PRUEBA PROLONGADA

Las gráficas mostradas anteriormente son el resultado de la prueba rápida de potencial con periodos de 5 segundos. Posteriormente se ilustran las gráficas correspondientes a la prueba prolongada, donde los periodos por salto de potencial son de 5 minutos comprendidos por el número de celdas y el potencial aplicado. En la figura 4.5 se muestra el desempeño eléctrico del EA  $\beta$  de una celda, con saltos de potencial en intervalos de 5 minutos.

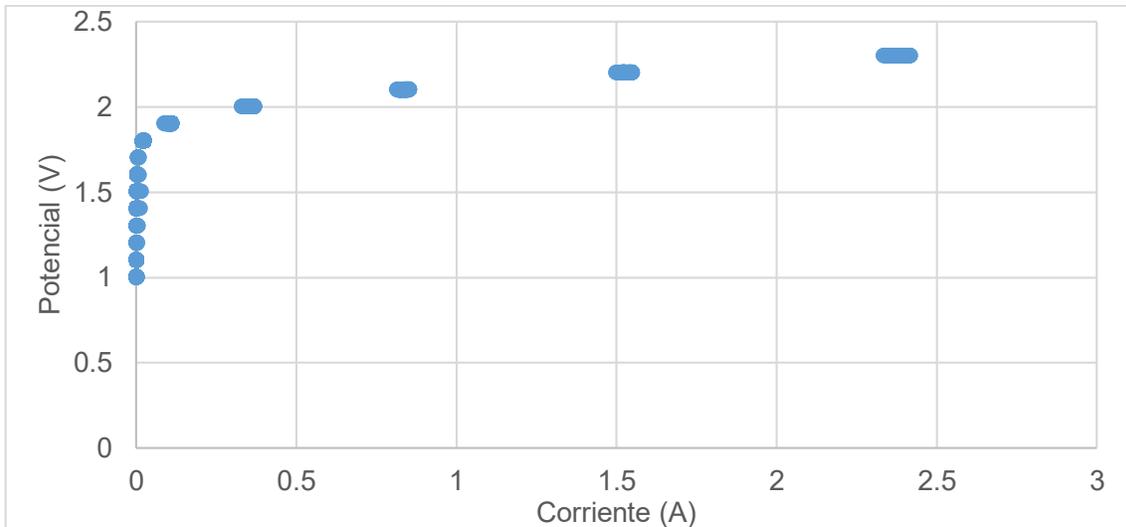


Figura 4.5 Desempeño del EA  $\beta$  de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V.

Se puede apreciar que la prolongación del potencial durante la prueba extendida permite estabilizar el área de activación, presentándose una desestabilización por la cantidad de calor generado a los 2.2 y 2.3 V. Es importante mencionar, que no se presenta ningún cambio en el flujo de corriente respecto a la figura 4.1 de la prueba rápida.

La figura 4.6 muestra el desempeño del EA  $\beta$  configurado con 2 celdas, con saltos de potencial de 0.2 V/5 minutos. Se observa que la respuesta eléctrica del flujo de corriente supera los 3.5 A en comparación con la figura 4.2 de la prueba rápida.

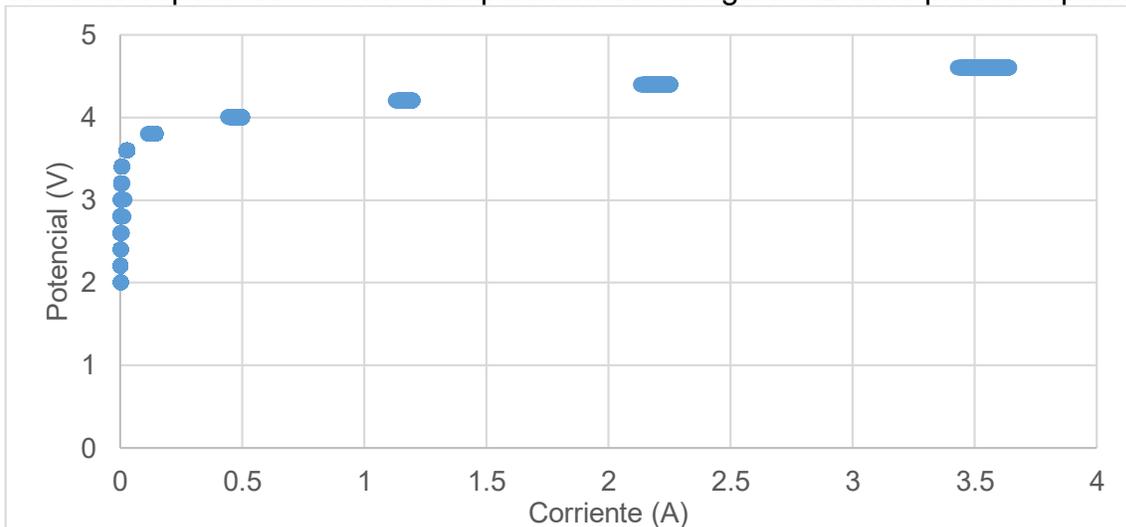


Figura 4.6 Desempeño del EA  $\beta$  de 2 celdas con saltos de potencial de 0.2 V/5 minutos comprendidos en 2.0 y 4.6 V.

En la figura 4.7 se ilustra el desempeño para 5 celdas inmersas en el EA  $\beta$ , con saltos de potencial de 0.5 V/5 minutos. Se puede observar que el cambio más

contrastador es el incremento del flujo de corriente durante el periodo de los 5 minutos. Para 10.5, 11.0 y 11.5 V el incremento de corriente es más notable.

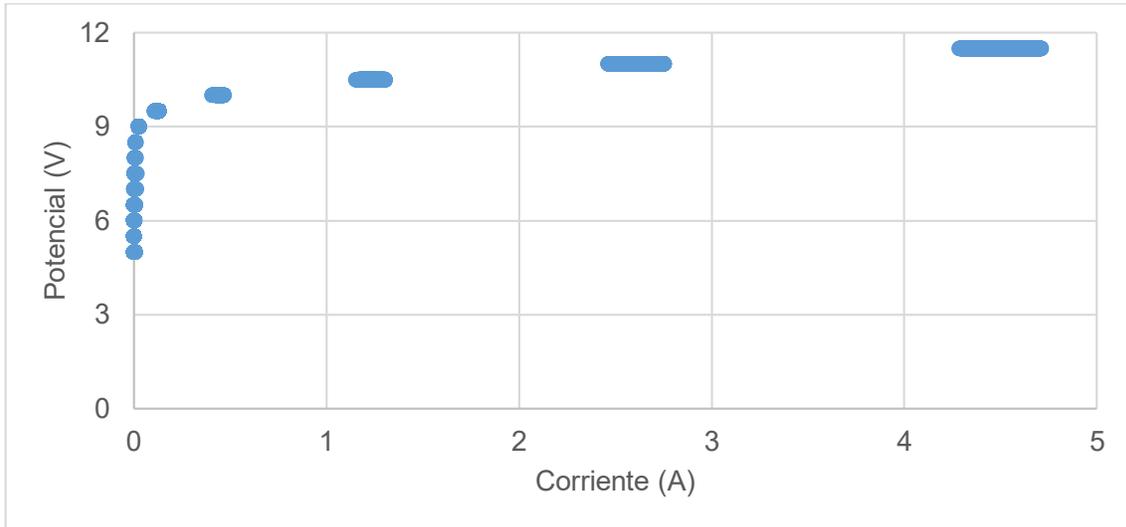


Figura 4.7 Desempeño del EA  $\beta$  de 5 celdas con saltos de potencial de 0.5 V/5 minutos comprendidos en 5.0 y 11.5 V.

La serie de pruebas prolongadas concluye con el desempeño que se muestra en la figura 4.8 correspondiente al ensayo con 7 celdas. Es posible observar que nuevamente ocurre una disminución en el flujo de corriente para el ensayo con 7 celdas en comparación con la figura 4.7 correspondiente a 5 celdas.

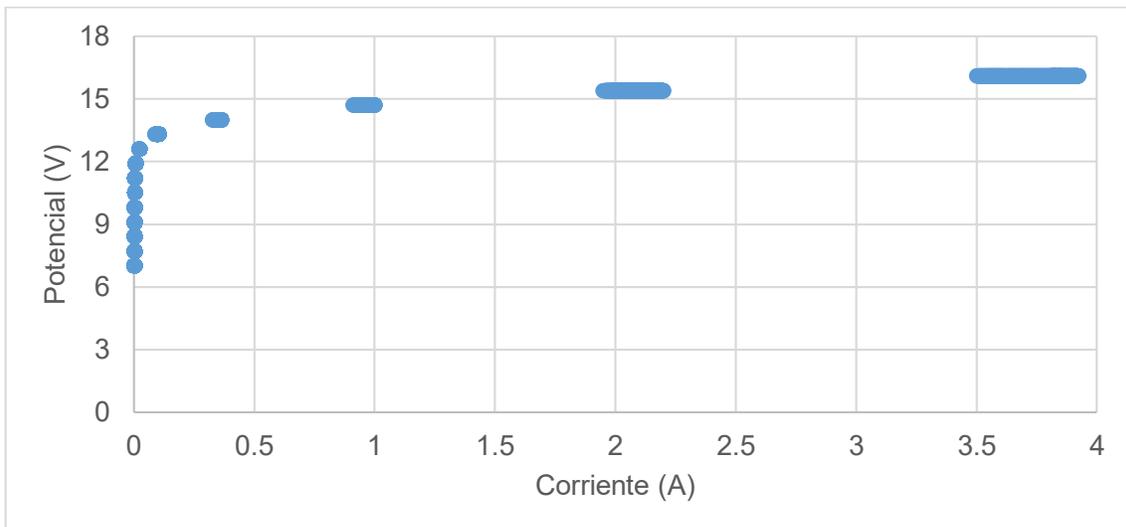


Figura 4.8 Desempeño del EA  $\beta$  de 7 celdas con saltos de potencial de 0.7 V/5 minutos comprendidos en 7.0 y 16.1 V.

Con las curvas realizadas correspondientes al desempeño eléctrico, además de ilustrar la respuesta respecto al flujo de corriente, es esencial determinar la característica de cada ensayo por medio de la curva de polarización. En esta curva característica se encuentra la densidad de corriente, el cual es el factor clave para

la evaluación óptima del sistema electroquímico en función del área efectiva de las placas bipolares. En la figura 4.9 se puede observar el conjunto de curvas correspondientes a 1, 2, 5 y 7 celdas de la prueba rápida.

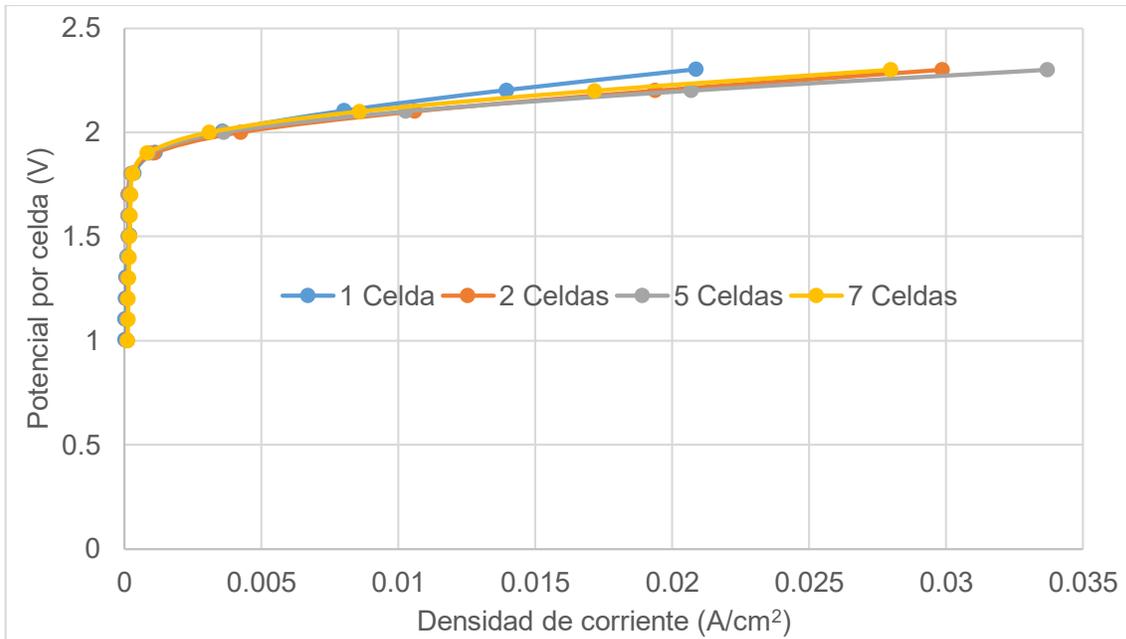


Figura 4.9 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba rápida de 5 segundos.

La figura 4.9 ilustra las diferencias en los desempeños eléctricos existentes entre 1, 2, 5 y 7 celdas. Se puede apreciar que, para el mismo potencial aplicado por el número de celdas, las disociaciones de los iones del electrolito ocurren a partir de los 1.9 V. Posteriormente, al continuar incrementando el potencial por celda el sistema necesita un mayor flujo de corriente para mejorar la evolución de los gases. Además, puede observarse que la respuesta de las 7 celdas es menor en la densidad de corriente en comparación con la curva de 2 y 5 celdas. Esto podría precisarse debido a la temperatura que ha alcanzado el electrolito por la mayor cantidad de celdas, lo cual hace al sistema más óptimo en cuanto a rendimiento.

En la figura 4.10 se muestra las respuestas de las curvas de polarización correspondientes a 1, 2, 5 y 7 celdas de la prueba prolongada.

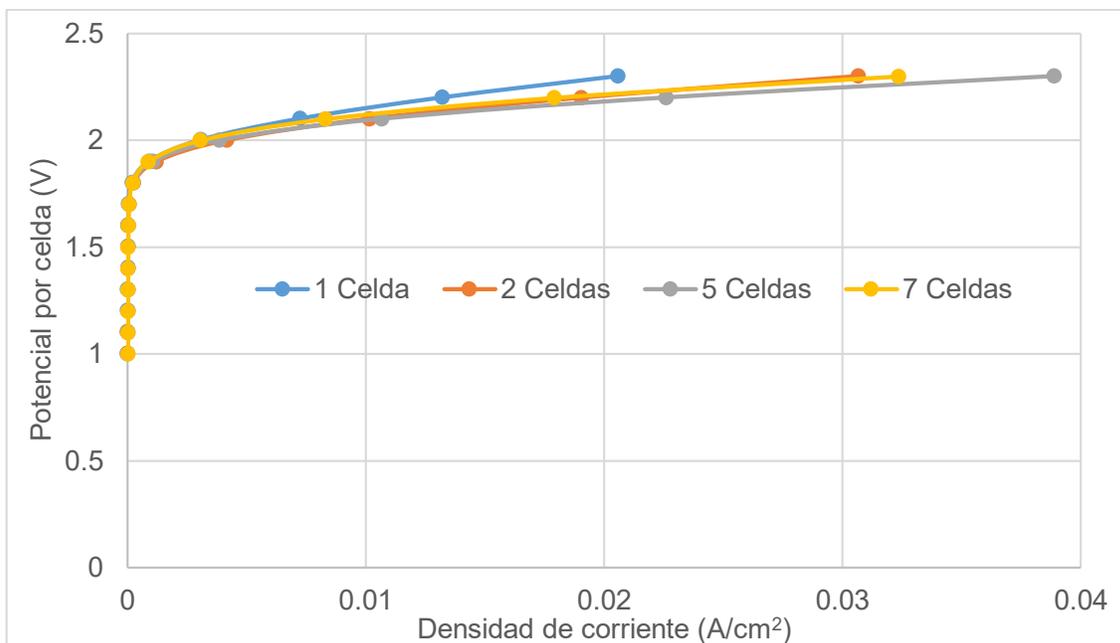


Figura 4.10 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba prolongada de 5 minutos.

En la figura 4.10 se puede observar que la prolongación de la actividad del EA  $\beta$  se encuentra ligeramente por encima de los valores reflejados en la prueba rápida, es notable que la densidad de corriente de la celda a 5 celdas es mayor por 0.005 A/cm<sup>2</sup> respecto a la prueba rápida de la misma curva.

## 4.2. RESULTADOS DEL ELECTROLIZADOR “ $\alpha$ ”

Esta nueva serie de resultados pertenecen al mismo grupo de pruebas efectuadas en el EA  $\beta$ , pero realizadas en el EA  $\alpha$ . Se estudia el comportamiento eléctrico del electrolizador para algunas de las curvas de caracterización comprendidas entre 1 celda y 7 celdas del EA  $\alpha$ .

La caracterización consiste en saltos de potencial con periodos de 5 segundos como prueba rápida y de 5 minutos como prueba prolongada por cada intervalo de potencial incrementado, en un rango entre 1.0 y 2.3 V por celda como potencial mínimo y máximo seccionados entre 14 intervalos.

### 4.2.1. PRUEBA RÁPIDA

Es de esperarse que los cambios sean principalmente en el flujo de corriente del EA debido a la reducción del área efectiva de las placas bipolares, esperando que la producción de los gases no se sustancialmente afectada. La figura 4.11 muestra el desempeño de una celda del EA  $\alpha$  para saltos de potencial de 1.0 a 2.3 V. Se observa que la tendencia continúa siendo la misma que la del EA  $\beta$ , donde a partir de 2.0 V comienzan las reacciones de desprendimiento de gases, además de una

reducción en el flujo de corriente de consumo del orden de 1 Amper, alcanzando los 2.3 V aproximadamente a 1.4 A.

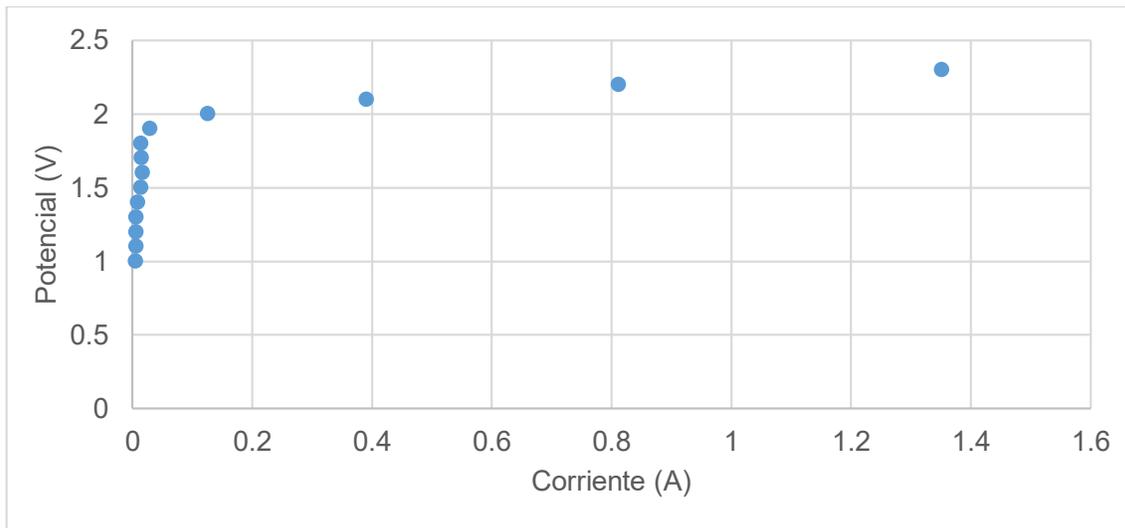


Figura 4.11 Desempeño del EA  $\alpha$  de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 segundos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V.

Para la configuración con el doble de celdas, el desempeño se muestra en la figura 4.12. En este caso el flujo de corriente se aproxima al doble del flujo mostrado anteriormente para una celda en el sistema, alcanzando los 1.8 A.

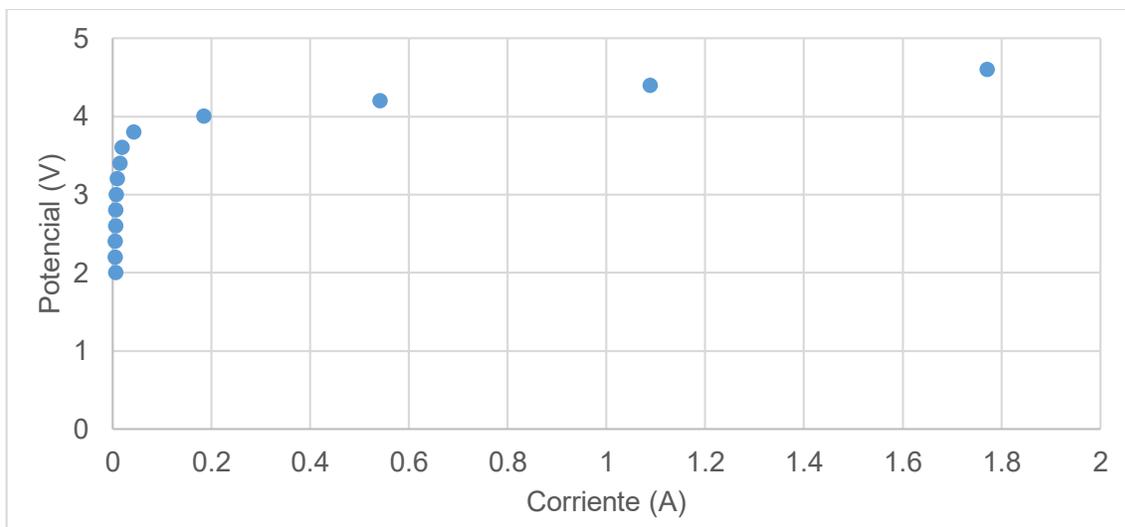


Figura 4.12 Desempeño del EA  $\alpha$  de dos celdas con saltos de potencial de 0.2 V/5 segundos comprendidos entre 2.0 y 4.6 V.

A continuación, la figura 4.13 ilustra el desempeño de 5 celdas en el sistema. Debido a que se incluyen 5 celdas el valor del flujo de corriente se incrementa alrededor de 3.0 A, alcanzando finalmente los 2.1 A.

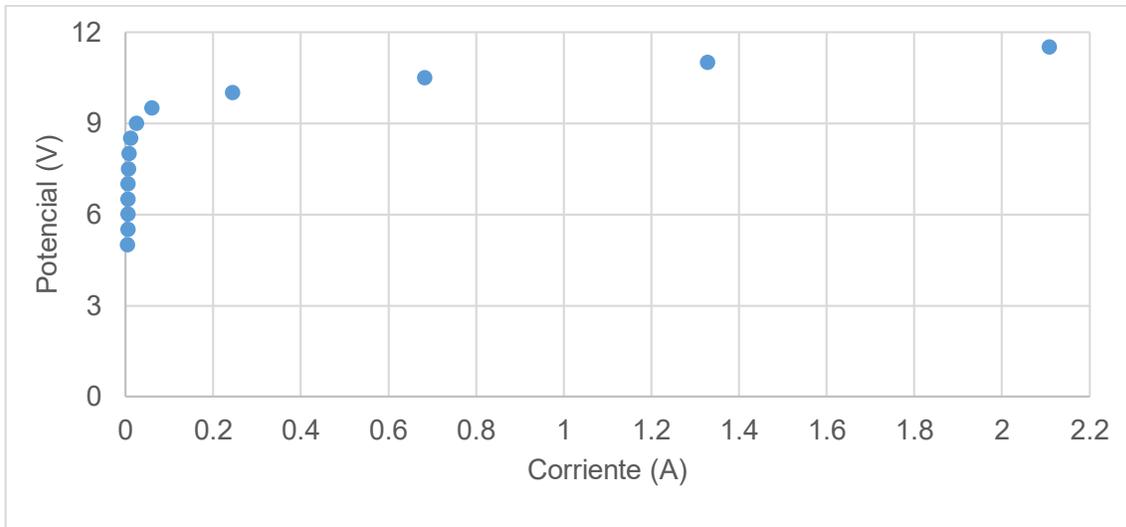


Figura 4.13 Desempeño del EA  $\alpha$  de cinco celdas con saltos de potencial de 0.5 V/5 segundos comprendidos entre 5.0 y 11.5 V.

La figura 4.14 muestra el desempeño de las siete celdas en el sistema, de esta forma se concluye con la caracterización de las pruebas rápidas. El sistema muestra el mismo comportamiento efectuado con el EA  $\beta$ , el flujo de corriente decae por debajo de valor máximo registrado para el test con cinco celdas, al igual que sucedió en el test para cinco y siete celdas de las pruebas prolongadas del EA  $\beta$ . Sin embargo, este comportamiento inusual podría indicar que: 1) está ocurriendo una saturación en el sistema por la influencia de una mayor cantidad de celdas o mejor aún, 2) la reducción del flujo de corriente indica que posiblemente existe un intervalo de equilibrio en la configuración de la cantidad de celdas en el EA. Se necesitan más estudios al respecto para tener una aseveración concluyente en el tema.

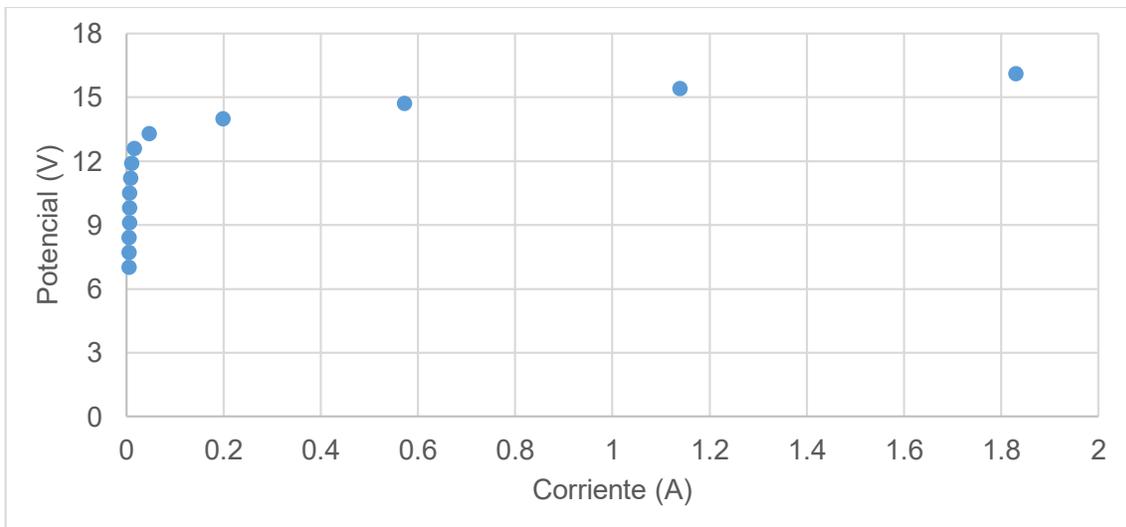


Figura 4.14 Desempeño del EA  $\alpha$  de siete celdas con saltos de potencial de 0.7 V/5 segundos comprendidos entre 7.0 y 16.1 V.

#### 4.2.2. PRUEBA PROLONGADA

Como parte de la caracterización experimental también se evaluó la prueba prolongada para el EA  $\alpha$ , a continuación, se muestran las gráficas de dicha prueba, donde los periodos por salto de potencial son de 5 minutos comprendidos por el número de celdas y el potencial aplicado. En la figura 4.15 se observa el desempeño eléctrico del EA  $\alpha$  de una celda, con saltos de potencial en intervalos de 5 minutos. En ambas pruebas se tiene un ligero aumento en el flujo de corriente cuando se trata del test prolongado en comparación con el test rápido.

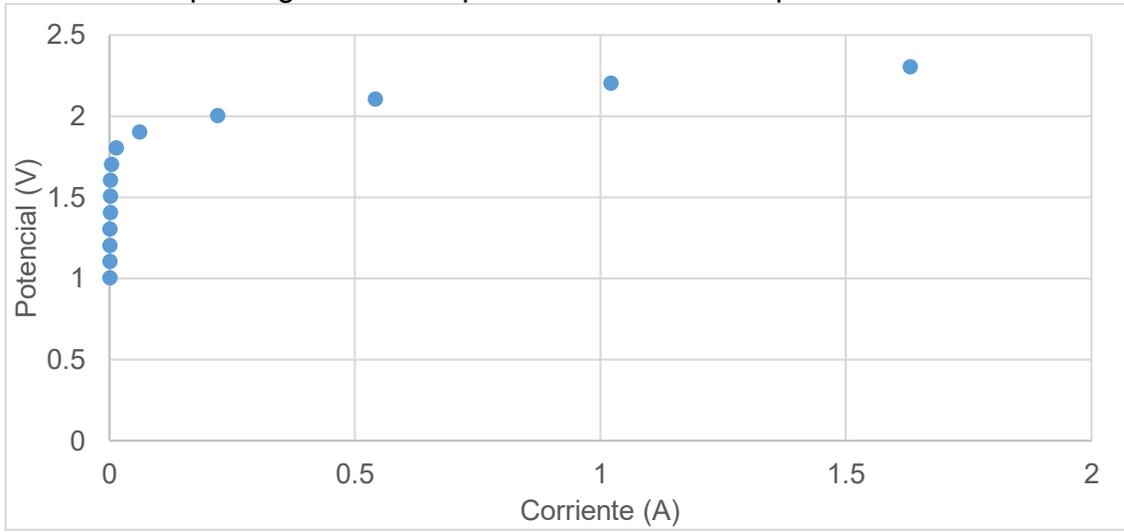


Figura 4.15 Desempeño del EA  $\alpha$  de una celda con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 1.0 y 2.3 V.

La figura 4.16 muestra el desempeño del EA  $\alpha$  con el doble de celdas configuradas anteriormente. Se puede apreciar que esta vez no se duplicó el flujo de corriente para este test. El incremento que ocurrió fue la amplitud entre el último salto de potencial, de alrededor de 0.8 A.

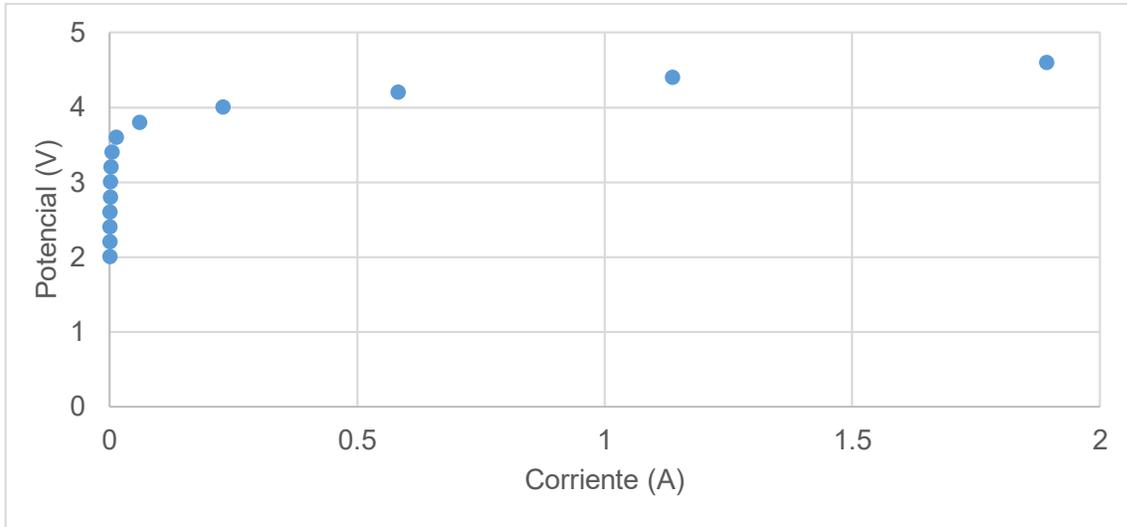


Figura 4.16 Desempeño del EA  $\alpha$  de dos celdas con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 2.0 y 4.6 V.

En la figura 4.17 se aprecia el desempeño de la configuración de cinco celdas en el sistema. La variación en la amplitud del flujo de corriente entre el salto de potencial es ligeramente superior a cinco celdas, y este se aproxima a los 2.5 A.

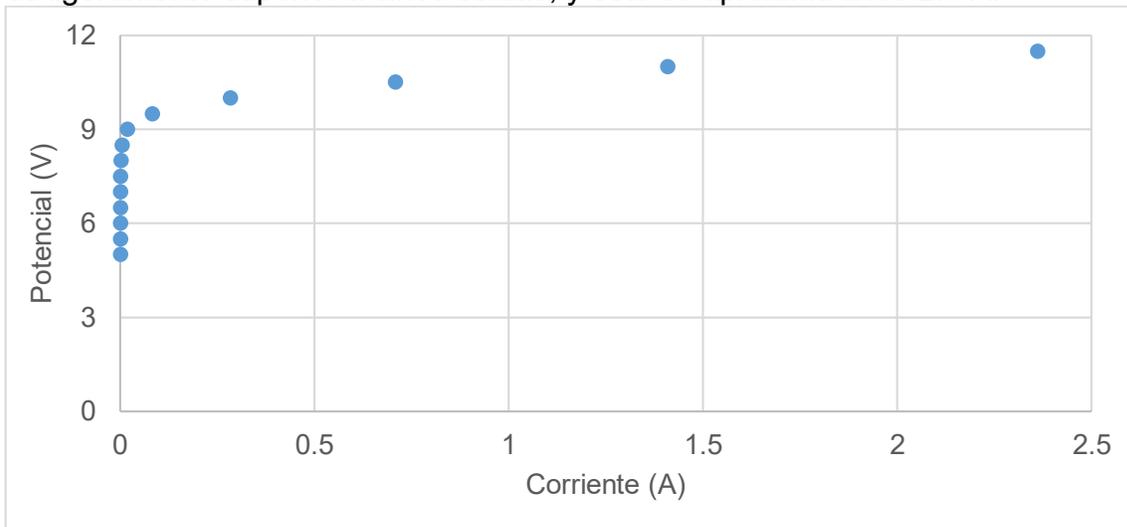


Figura 4.17 Desempeño del EA  $\alpha$  de cinco celdas con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 5.0 y 11.5 V.

La figura 4.18 muestra el desempeño del test final para la configuración de siete celdas en el sistema. Era de esperarse que disminuyera el flujo del pico de corriente tal como se efectuó en las pruebas del test de 5 segundos. En relación con el test

mostrado anteriormente de cinco celdas, la diferencia es de 0.2 A y en relación al EA  $\beta$  para el test prolongado la diferencia es muy significativa.

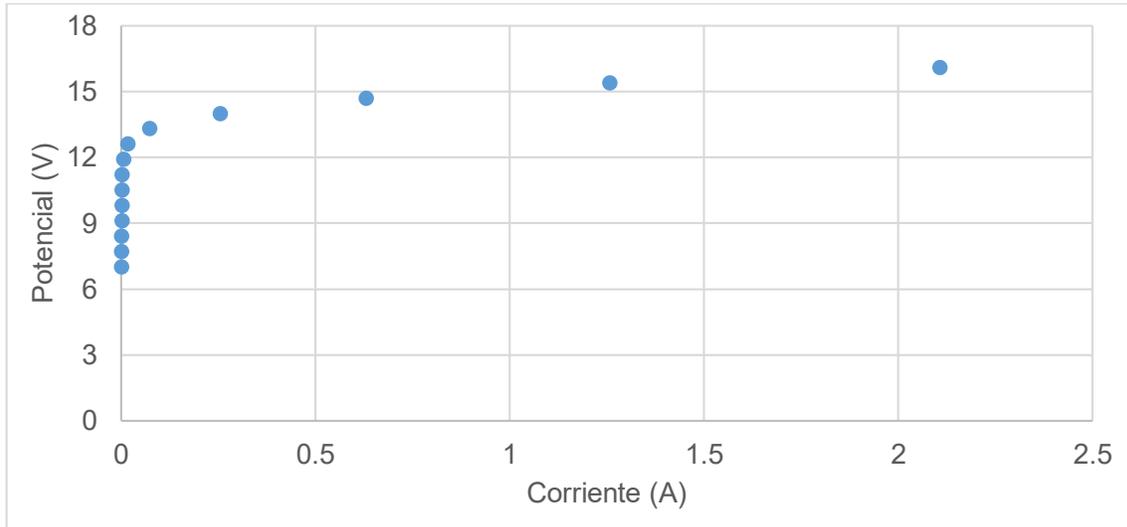


Figura 4.18 Desempeño del EA  $\alpha$  de siete celdas con saltos de potencial de 0.1 V/5 minutos comprendidos entre 7.0 y 16.1 V.

Efectuadas las pruebas particulares de cada test por el escalamiento de celdas, tanto la prueba rápida como la prueba prolongada, el siguiente paso es la evaluación de la curva característica en una compilación de las pruebas evaluadas respecto a la prueba rápida como la prueba prolongada.

La figura 4.19 muestra una serie de curvas compiladas de la prueba rápida respecto a la densidad de corriente desarrolladas para una mejor observación del desempeño de cada una, como el comportamiento mostrado en el escalamiento de las siete celdas. Es posible observar el incremento de la densidad de corriente con respecto

al aumento en el número de celdas que integran el sistema, así como valor pico de esta de alrededor de  $0.032 \text{ A/cm}^2$ .

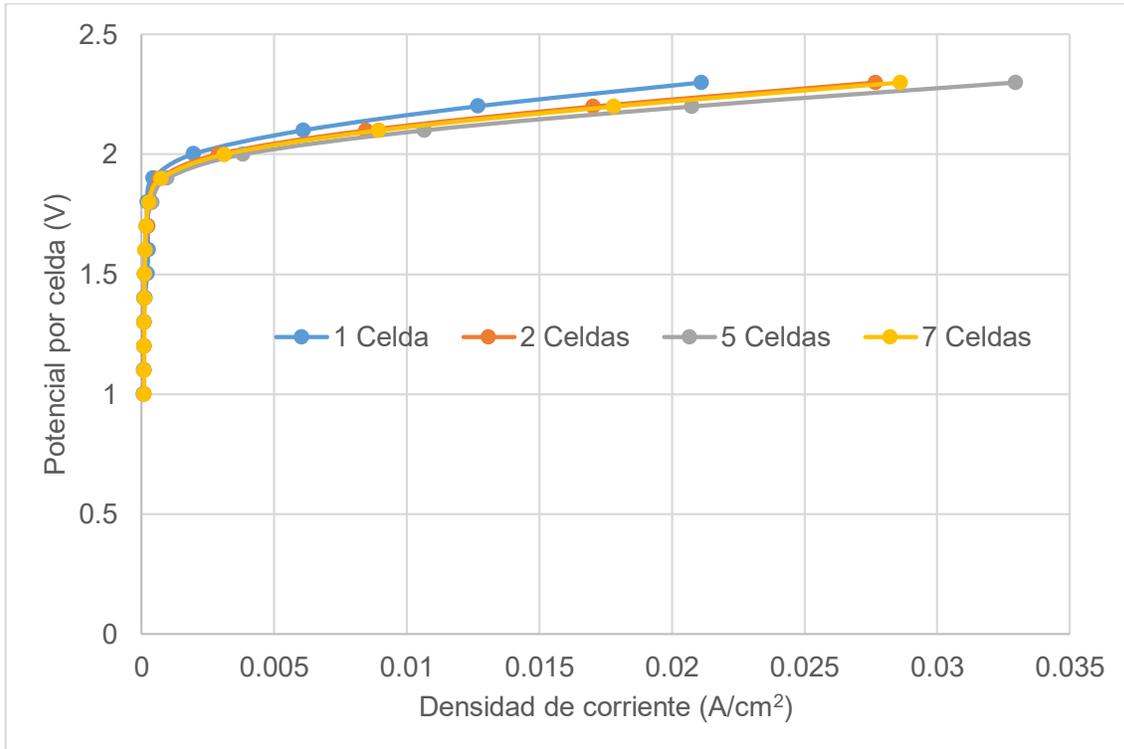


Figura 4.19 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba rápida de 5 segundos del EA  $\alpha$ .

En la figura 4.20 se muestra la serie de curvas de polarización del test prolongado para el escalamiento de las siete celdas. Se ilustra el desempeño por cada test realizado respecto a la densidad de corriente arrojada sobre el potencial por celda. Esta no difiere a grandes rasgos de la prueba rápida ya que puede observarse que ocurre la disminución en la densidad de corriente para el test evaluado con las siete celdas. El valor máximo de la densidad de corriente alcanzada es de  $0.036 \text{ A/cm}^2$ .

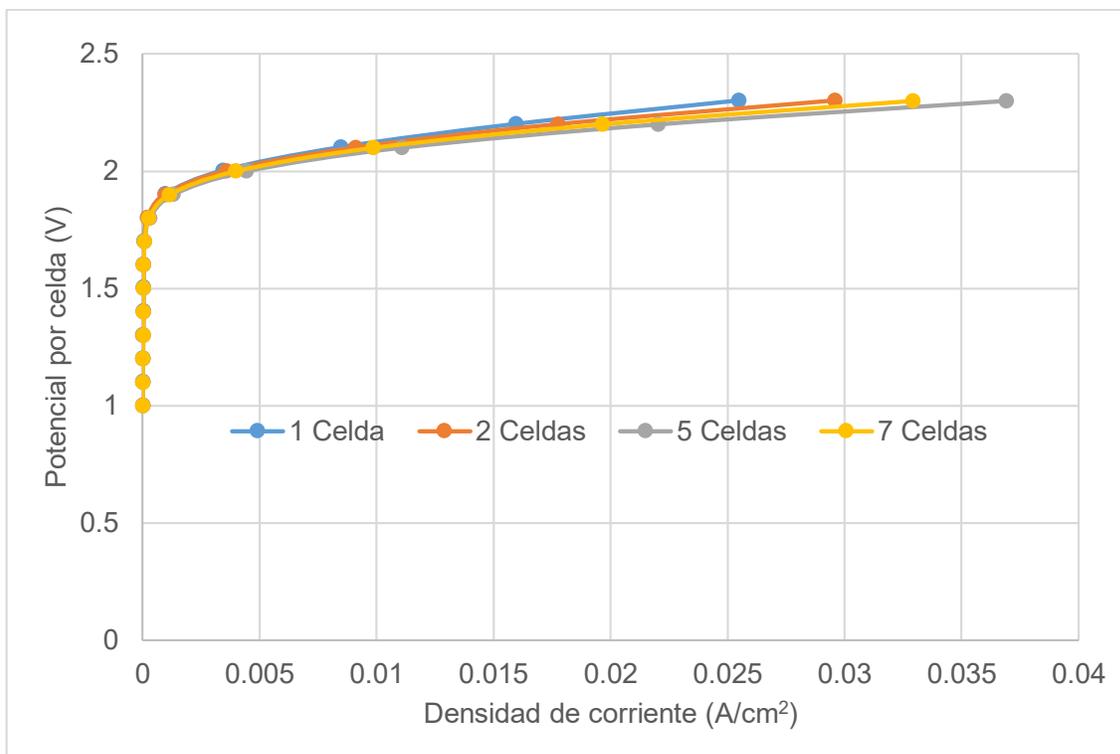


Figura 4.20 Curvas de polarización obtenidas de los promedios realizados con los resultados de la prueba prolongada de 5 minutos.

### 4.3. COMPARACIÓN ENTRE LOS EA, $\beta$ Y $\alpha$

La obtención de los resultados de ambos electrolizadores permite realizar una comparación del desempeño de cada uno para un determinado número de celdas, comprendidas en el sistema de las pruebas rápidas como las pruebas prolongadas. La figura 4.21 ilustra las diferencias en el desempeño del ensayo de saltos de potencial entre el electrolizador  $\beta$  y  $\alpha$ , por medio de una serie de curvas potencial-corriente concentradas para un periodo de 5 segundos. En esta figura se puede observar que el flujo de corriente es mucho mayor en el desempeño del EA  $\beta$ . Este comportamiento es totalmente predecible debido a la diferencia en el área efectiva del electrolizador  $\alpha$  respecto al electrolizador  $\beta$ . Por lo tanto, el objetivo de reducir el flujo en la corriente de consumo ha sido efectuado.

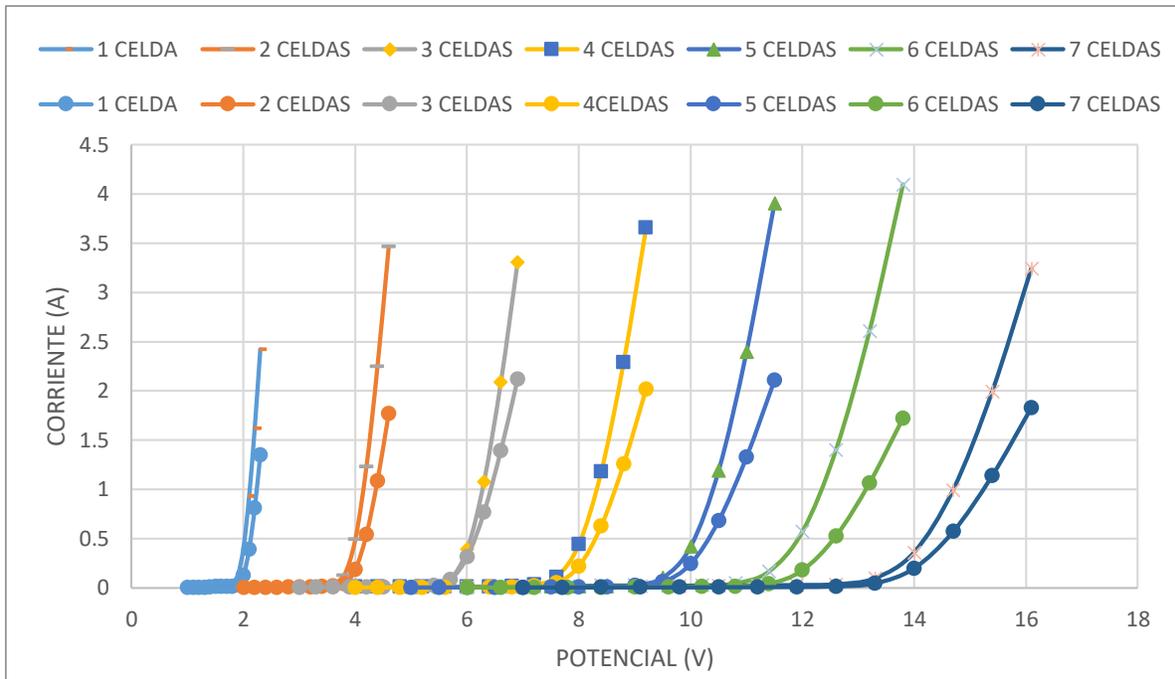


Figura 4.21 Serie de curvas del desempeño potencial-corriente para la prueba rápida de 5 segundos del EA  $\beta$  y EA  $\alpha$ .

Un comportamiento que no se esperaba encontrar fue la disminución en el flujo de corriente de consumo al realizar el incremento de las celdas a cada sistema en particular. Puede observarse que para el test realizado con tres celdas hay una disminución del flujo de corriente, así como para el test realizado con siete celdas del electrolizador alcalino  $\beta$ . Esto no cambia para el electrolizador alcalino  $\alpha$ , pues en el test efectuado con cuatro, seis y siete celdas no se presentó un comportamiento ascendente respecto al incremento de celdas.

La figura 4.22 ilustra las características en el desempeño del ensayo de saltos de potencial entre el electrolizador  $\beta$  y  $\alpha$  por medio de una serie de curvas de polarización concentradas para el periodo de los 5 segundos. En la ilustración puede observarse que a simple vista no hay una diferencia significativa en la densidad de corriente de ambos sistemas, salvo para el caso del test de seis celdas en el electrolizador  $\alpha$ . Los demás ensayos presentan casi los mismos desempeños, pero con ligeras variaciones presentes en el test de dos y tres celdas del electrolizador  $\alpha$ .

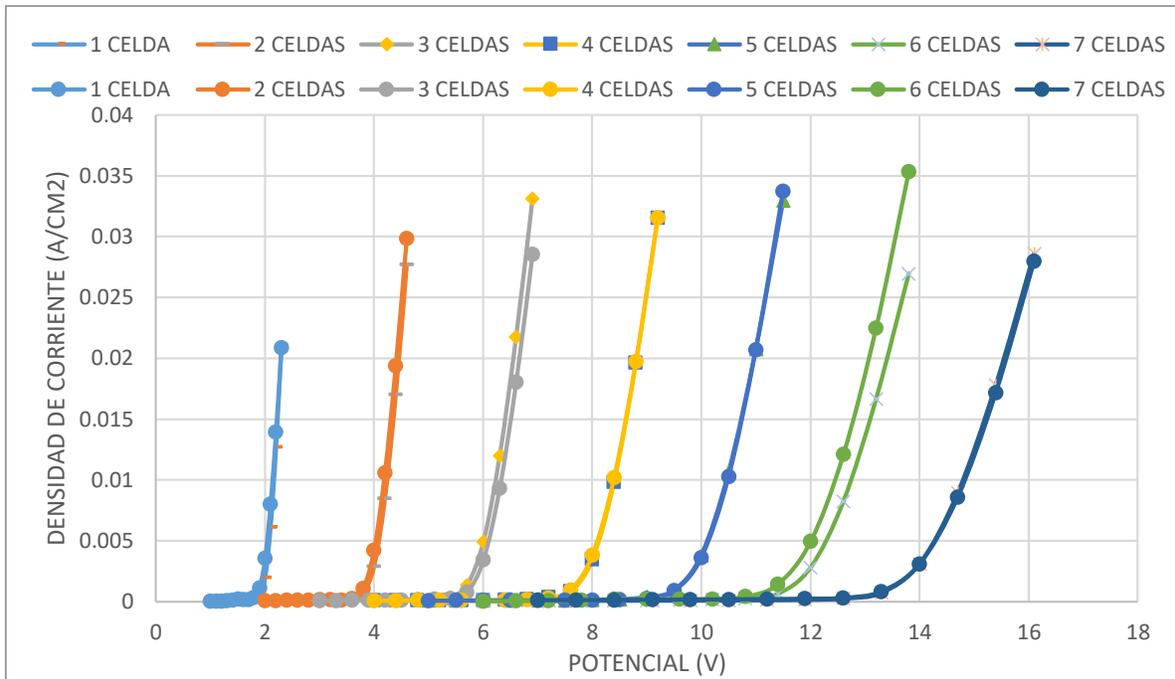


Figura 4.22 Serie de curvas de polarización obtenidas de la prueba rápida para el EA  $\beta$  y el EA  $\alpha$ .

La figura 4.23 ilustra las diferencias en el desempeño del ensayo de saltos de potencial entre el electrolizador  $\beta$  y  $\alpha$ , por medio de una serie de curvas potencial-corriente obtenidas de la prueba prolongada de 5 minutos.

La tendencia que sigue el electrolizador  $\alpha$  es similar al electrolizador  $\beta$ , es claro que los ensayos entre las pruebas rápidas y prolongadas solo muestran una ligera diferencia en el flujo de la corriente de consumo, donde el electrolizador  $\alpha$  registra valores más tolerables en comparación con el electrolizador  $\beta$ . Este comportamiento se repitió, nuevamente se presentó la disminución del flujo de corriente para los ensayos en tres y siete celdas del electrolizador  $\beta$  y en el ensayo con seis celdas del electrolizador  $\alpha$ . Para determinar si esta disminución en la densidad de corriente para la configuración de tres y siete celdas fue provocada por una saturación debido al número de celdas, es importante efectuar un par adicional de ensayos agregando dos celdas más al sistema y corroborar si dicho comportamiento es a causa de este incremento en el número de celda, o podría intuirse que el electrolito sea la causa de la disminución del flujo de corriente.

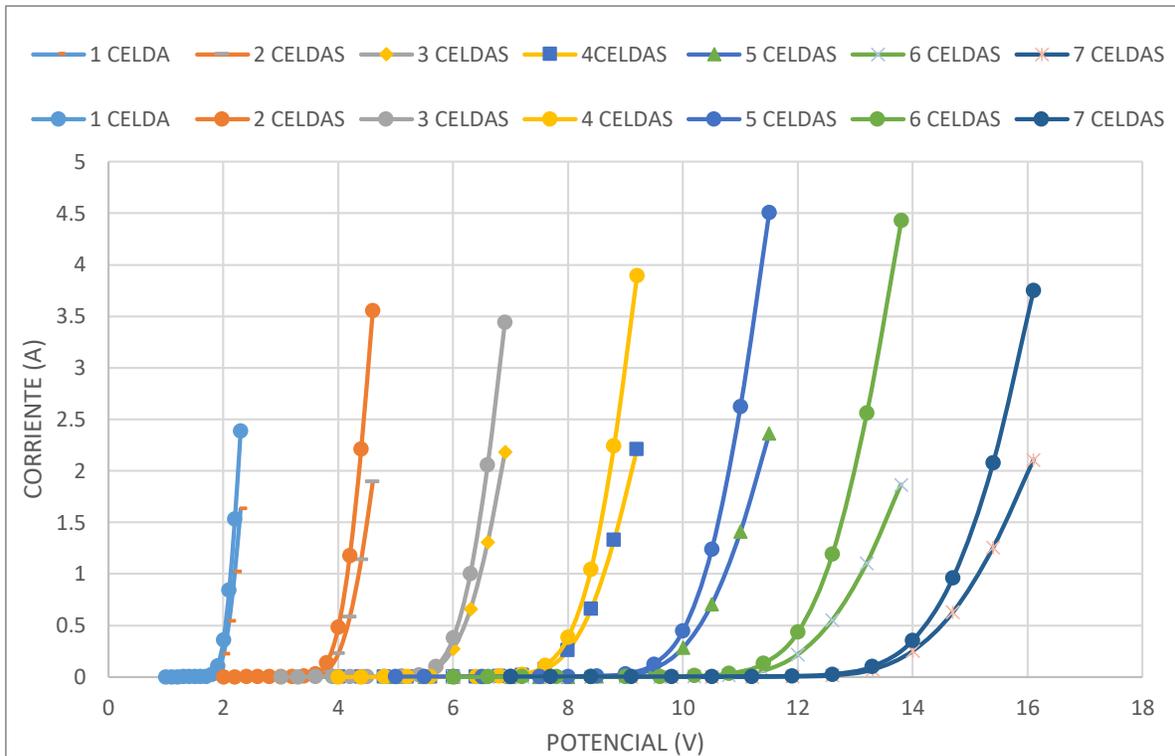


Figura 4.23 Serie de curvas del desempeño potencial-corriente para la prueba prolongada de 5 minutos del EA  $\beta$  y EA  $\alpha$ .

La figura 4.24 ilustra las características en el desempeño del ensayo de saltos de potencial entre el electrolizador  $\beta$  y  $\alpha$  por medio de una serie de curvas de polarización concentradas para el periodo de los 5 minutos. Se puede observar que en desempeño del electrolizador  $\alpha$  es superior en los ensayos con dos y cinco celdas, y para cuatro y siete celdas se mantiene ligeramente por debajo de los valores del electrolizador  $\beta$ . Solo en el caso de los ensayos de uno y seis celdas el registro se quedó muy por debajo.

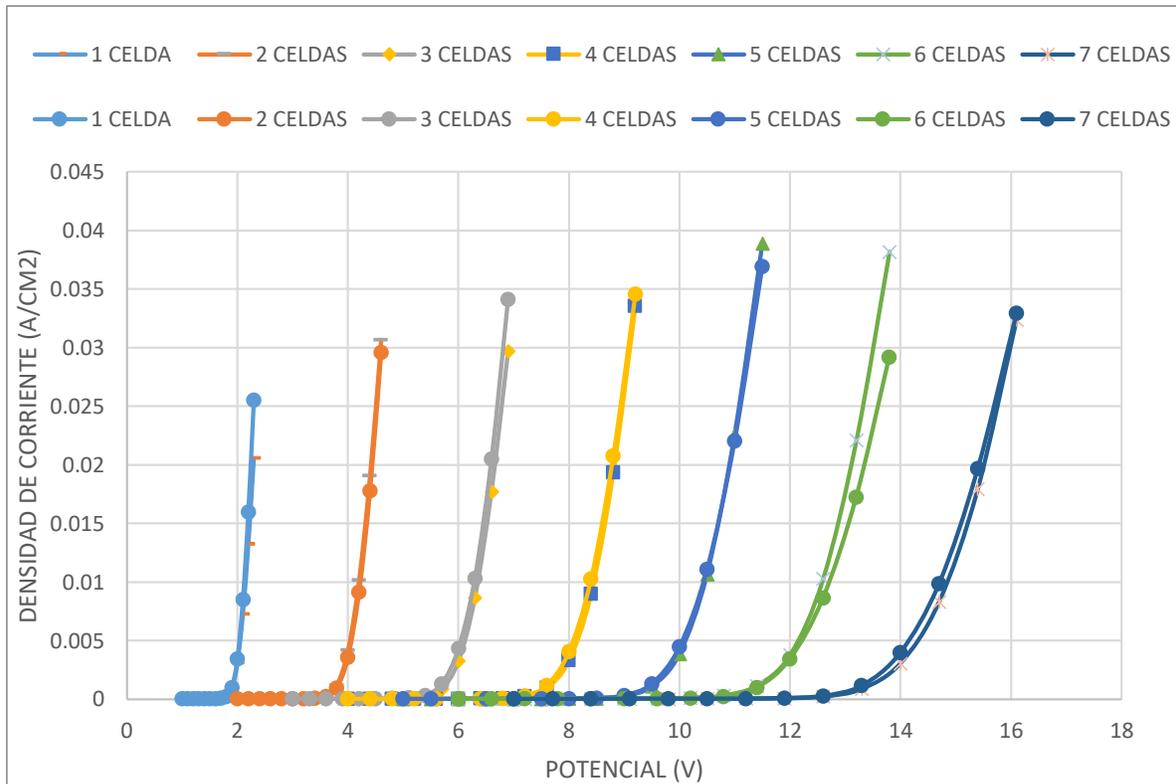


Figura 4.24 Serie de curvas de polarización obtenidas de la prueba rápida para el EA  $\beta$  y el EA  $\alpha$ .

#### 4.4. ENERGÍA DISPONIBLE PARA COMBUSTIÓN

Las curvas de polarización, el escalamiento, las características eléctricas (i.e. potencial, corriente y potencia), caracterizan la energía de entrada y la eficiencia de las celdas (EA). Estos resultados permiten determinar la energía de salida y su posible implementación como combustible directo o combustible secundario (enriquecimiento) en un motor de combustión. Este análisis es simplificado a la primera ley de la termodinámica, usando la definición de entalpia y la ley de electrolisis de Faraday.

En primera instancia, la relación de eficiencia y energía producida en las celdas caracterizadas, nos pueden delimitar el dimensionamiento: i) la corriente total, usando la ecuación 17 del capítulo 2, permite determinar la producción de hidrógeno en moles, la cual puede ser convertida, a través de la primera ley, a energía. ii) Por otro lado, la ecuación 21 y el potencial por celda, determina la eficiencia del electrolizador. La figura 4.25 presenta el resumen de los resultados determinados para el electrolizador construido, la energía es calculada con una entalpia de 286 kJ/mol y es supuesta una operación estable de 1 hora, la eficiencia es determinada con un potencial termoneutral de 1.4 V por celda.

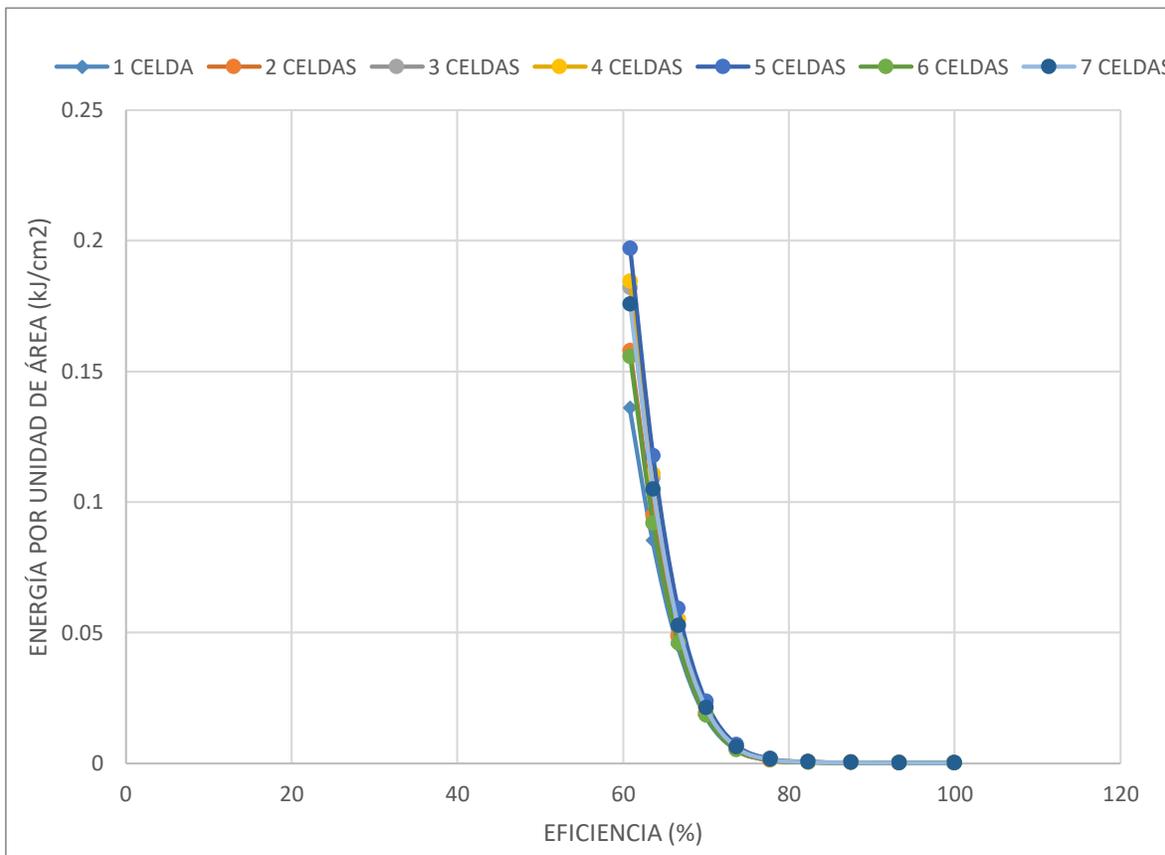


Figura 4.25 Energía por unidad de área en función de la eficiencia global de la celda, cálculos realizados por celda y para una hora de operación en estado estable.

Se observa que el comportamiento de todas las celdas es similar, desde este punto de vista global, la producción de energía en función de la eficiencia es independiente del escalamiento. Los datos de la gráfica pueden ser usados para un modelado. De esta imagen podemos determinar que a una eficiencia de ~60% se puede obtener entre 0.135 y 0.196 kJ/cm<sup>2</sup>, y a una eficiencia de ~66% se puede obtener entre 0.045 y 0.052 kJ/cm<sup>2</sup>.

El comportamiento de conversión de energía de un vehículo de combustión interna resulta complejo debido a los múltiples factores físicos del sistema y además la demanda energética altamente dinámica. Sin embargo, muchos estudios se han realizado y los modelos pueden ser tan detallados, como para incluir el transporte de especies dentro del pistón o tan generales como para sólo determinar una eficiencia global, esta delimitación atiende a las metas del alcance del estudio. Por ejemplo, para nuestros objetivos y validación de la hipótesis de esta tesis de licenciatura, se usará la información de dos artículos científicos: 1) *An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system* publicado por N. Saravanan, et al, en el 2008. 2) *Engine performance powered by a mixture of hydrogen and oxygen fuel obtained from water electrolysis*, publicado por A. M. Falahat en el 2014 [1].

En la primera referencia, usan un motor enfriado por agua, mono-cilindro, de 4 tiempos y una relación de compresión de 16.5:1, está maquina tiene una potencia máxima de 3.78 kW @ 1500 rpm, lo cual se puede convertir, de manera directa, a una energía instantánea de 3.78 kJ en un segundo. N. Saravanan realiza la experimentación y determina que el enriquecimiento de hidrógeno mejora la eficiencia térmica a 29.1% con 90% de enriquecimiento de hidrógeno. Realizan otros cálculos de gases NOx y rendimiento de combustible, determinando que los mejores resultados se obtienen a 30% de enriquecimiento con una eficiencia de 27.9%.

En la segunda referencia, el motor usado por Falahat, es una máquina mono-cilindro, cuatro tiempos y encendido por chispa, refrigerado por aire, fabricado por Honda Company. Este autor especifica: 5.5 hp, una relación de compresión de 6.5:1 y un torque máximo de 10.4 Nm @ 2500 rpm, 3.7 kW @ 3600 rpm. Falahat también concluye, que la experimentación permitió validar, que el enriquecimiento de hidrógeno mejora la eficiencia térmica debido a la amplia inflamabilidad y velocidad de la llama rápida, encontrado el máximo de beneficio a 23% de enriquecimiento. En las figuras 4.26, 4.27 y 4.28 se puede apreciar algunos de los resultados obtenido al introducir hidrógeno en el motor usado por Falahat.

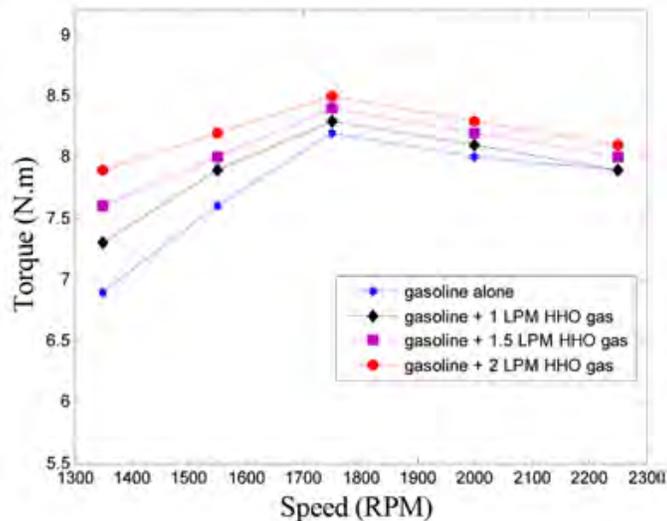


Figura 4.26 Curvas comparativas de torque y velocidad de motor empleando gasolina y gasolina con oxi-hidrógeno [2].

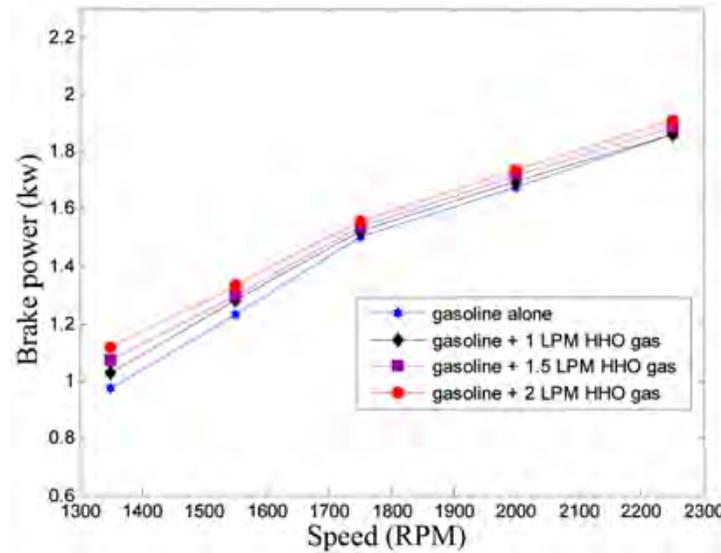


Figura 4.27 Curvas comparativas de potencia y velocidad del motor empleando gasolina y gasolina con oxo-hidrógeno [2].

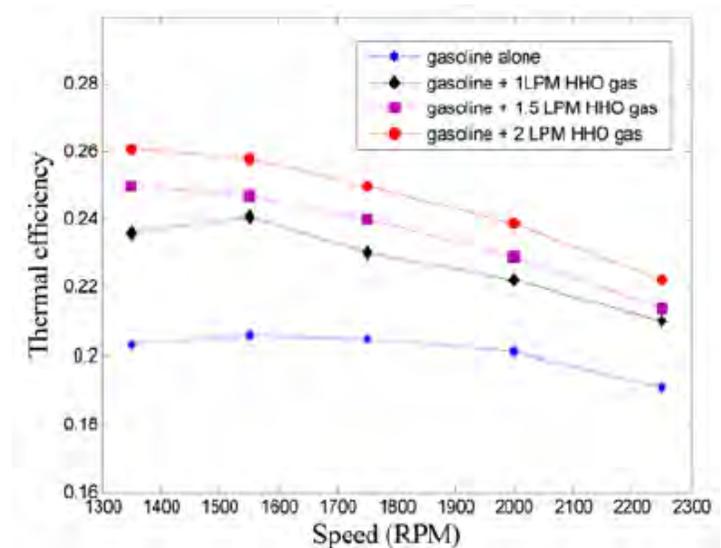


Figura 4.28 Curvas comparativas de eficiencia térmica y velocidad del motor empleando gasolina y gasolina con oxo-hidrógeno [2].

La determinación reversible; despreciando los efectos que puede ocasionar el hidrógeno, el oxígeno y agua contenida, es decir, despreciando las pérdidas térmicas, mecánicas, químicas, eléctricas, y otros factores; a las energías determinadas, la podemos igualar de manera directa (cálculos rápidos para validación de la hipótesis de esta tesis de licenciatura).

Es importante recalcar que la eficiencia del electrolizador ya está considerada (especificada en la figura 4.25) y que el valor de las referencias [1, 2] son deterministas y experimentales. De tal forma que podemos suponer que los gases

de nuestros electrolizadores pueden proveer el porcentaje de energía requerida en dichos motores.

Para la referencia [1], el motor requiere el 30% de la energía, lo cual equivale a 1.134 kJ/s, en una condición muy hipotética y drástica de operación, en una hora requeriría 4,082.4 kJ. Para la referencia [2], el motor requiere el 23% de la energía, lo cual equivale a 0.851 kJ/s, en una condición muy hipotética y drástica de operación, en una hora requeriría 3,063.6 kJ.

Con nuestros datos de la figura 4.25, y considerando el área del EA  $\beta$  (116 cm<sup>2</sup>), podemos dimensionar el electrolizador para cada caso.

1. Para la referencia [1] se requiere un electrolizador de 259 celdas en operación al 60% ó 779 celdas en operación al 66%. Por otro lado, cambiando la estrategia de dimensionamiento, y condicionando el número de celdas para operación de 12 V (lo de una batería de auto convencional), en una eficiencia del 60% se requerirían 6 celdas con un área de 5,004 cm<sup>2</sup> (0.5 m<sup>2</sup>), en un área cuadrada esto sería un electrodo de 70.7 cm por lado.
2. Para la referencia [2] se requiere un electrolizador de 194 celdas en operación al 60% o 584 celdas en operación al 66%. Condicionando el número de celdas para operación de 12 V, en una eficiencia del 60% se requerirían 6 celdas con un área de 3,755 cm<sup>2</sup> (0.38 m<sup>2</sup>), en un área cuadrada esto sería un electrodo de 61.3 cm por lado.

## REFERENCIA

[1] N. Saravanan, G. Nagarajan. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *Int Journal Hydrogen Energy*. 2008 33: 1769-1775.

[2] A. M. Falahat, et al. Engine performance powered by a mixture of hydrogen and oxygen fuel obtained from water electrolysis. *International Journal of Automotive Technology*. 2014 15: 97-101.

## CONCLUSIONES

Es imprescindible una transición energética para replantear el alcance de un mejor futuro. Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, el hidrógeno ha supuesto una estrategia para el emprendimiento de un sistema energético más sostenible en donde se plantea que la electrólisis del agua puede ser la estrategia para tener un vector energético 100% renovable y de cero emisiones de gases efecto invernadero.

La elección de un electrolizador alcalino para la producción de oxi-hidrógeno es un paso sencillo para empaparse con toda la tecnología que con lleva el uso adecuado del hidrógeno, partiendo desde la experimentación que conlleva el aprendizaje del funcionamiento de una celda, las características, la manufactura más asequible y económica, y principalmente las mejoras que pueden realizarse para tener un mejor sistema de generación de oxi-hidrógeno.

Los electrolizadores caracterizados muestran un desempeño similar con diferencias muy escasas, los cambios realizados en la geometría disminuyeron la cantidad de corriente de operación por la mitad, pero la densidad de corriente, es decir, la cantidad de corriente que fluye a través de un área superficial es la misma que fluye en ambos electrolizadores. Esto puede atribuirse por el material de los electrodos o placas, el acero inoxidable es un buen conductor de electricidad y resistente a la corrosión, pero se necesita la presencia de un agente que facilite la actividad catalítica que se desarrolla en la interfaz del electrodo y el electrolito para proporcionar mejoras en el rendimiento de los electrolizadores. Además de mejores materiales para los electrodos, la circulación o movimiento del electrolito puede ser de ayuda para evitar la formación de la doble capa de burbujas en las paredes de los electrodos y tener una generación más óptima de los gases. La estrategia de caracterización permite evaluar el escalamiento tanto de número de celdas, como de área de electrodo, así como la delimitación del protocolo de caracterización.

Los resultados demuestran que, desde un punto de vista muy general, la energía por unidad de área, por celda, en función de la eficiencia, es muy similar entre ellas. Esta conclusión nos lleva a que es posible determinar de manera directa el área y/o el número de celdas requeridas para satisfacer una cantidad específica de enriquecimiento de combustible. Se determinó: 1) energía por unidad de área, por celda, posible de generar en una hora, 0.135-0.196 kJ/cm<sup>2</sup> @ 60% eficiencia y 0.045-0.052 kJ/cm<sup>2</sup> @ 66% de eficiencia. 2) Tamaño de electrolizador requerido para un motor de combustión de 3.7 kW @ 3600 rpm, con 23% de enriquecimiento, 194 celdas con el área del EA  $\beta$  (116 cm<sup>2</sup>) @ 60% de eficiencia y 0.380 m<sup>2</sup> con un electrolizador de 6 celdas (para trabajar a ~12V) @ 60% de eficiencia.